



**Concreto de Alto Desempeño**

**ING. Ricardo Javier Benavides CH.**

**Escuela Colombiana de ingeniería**

**Posgrado en Ingeniería Civil**

**Bogotá Colombia**

**2014**



**Concreto de Alto Desempeño**

**Ricardo Javier Benavides Chamorro**

**Tesis presentada como requisito para optar al título de:**

**Magister en Ingeniería Civil**

**Director**

**Ing. Jorge Segura Franco**

**Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito**

**Posgrado en Ingeniería Civil**

**Bogotá Colombia**

**2014**

**A Dios, por brindarme la oportunidad  
de proponer nuevas metas en mi vida.  
A mis padres quienes son mi ejemplo.  
A Julián y Samuel Benavides por  
ser la fuerza en mi corazón.**

## **Agradecimientos**

El autor quiere agradecer de manera especial al ingeniero Jorge Segura y a la empresa Argos de industria cementera colombiana por facilitar los recursos e insumos necesarios para el desarrollo de los especímenes. A las directivas y operarios de la Escuela Colombiana de ingeniería por el facilitar el espacio necesario para el desarrollo de ensayos de laboratorio.

## Resumen

Se compilan en esta tesis parámetros que deben aplicarse en los procesos de producción de concretos de alto desempeño, con el ánimo de promover un mayor uso de este material. Se resaltan los parámetros que permiten la obtención de este tipo de concretos como la relación agua material cementante, tamaño del agregado y curado. Se detallan las técnicas de adición de minerales como humo de sílice, ceniza volante, escorias y aditivos químicos que aportan manejabilidad. Se promueve la utilización del concreto de alto desempeño por sus condiciones de durabilidad, sostenibilidad y el uso eficiente del agua. Se realiza una introducción a la industrialización de este tipo de concretos con la estandarización de controles de calidad desde la obtención de materias primas, fabricación, transporte y colocación en sitio. Al finalizar el documento se describe la dosificación de mezclas de uso convencional de 21 MPa, y mezclas de 42, 49 y 56 MPa, donde se refuta de paso, su difícil fabricación. Para las mezclas obtenidas se validan sus propiedades mecánicas, como resistencia y módulo de elasticidad; evaluando sus ventajas, desempeño y durabilidad. Los ensayos para caracterizar el desempeño y durabilidad son de uso convencional en las normas nacionales, internacionales y en la industria colombiana como son: ensayos de porosidad, absorción, permeabilidad al agua, penetración de ion cloruros, coeficiente de difusión, resistencias a la carbonatación y a la abrasión. Para cada ensayo se presentan sus respectivas conclusiones y análisis de resultados. Finalmente, se da a conocer la necesidad aplicar concretos con mayor desempeño y durabilidad.

**Abstract**

Parameters are compiled in this thesis to be applied in the production process of high-performance concrete, with the aim of promoting greater use of this material. The parameters for obtaining this type of concrete and the water-cementitious material, aggregate size and curing are highlighted. Techniques adding minerals like silica fume, fly ash, slag and chemical additives that provide detailed handling. The use of high performance concrete conditions for its durability, sustainability and water efficiency is promoted. An introduction to the industrialization of this type of concrete with the standardization of quality control from raw material extraction, manufacturing, transportation and site placement is made. Upon completion of dispensing paper conventionally used mixtures of 21 MPa, and mixtures of 42, 49 and 56 MPa, which step is refuted, its manufacture is disclosed difficult. To the mixtures obtained are validated mechanical properties such as strength and modulus of elasticity; assessing their advantages, performance and durability. The tests to characterize the performance and durability are conventionally used in national, international standards and the Colombian industry including: tests porosity, absorption, water permeability, penetration of ion chlorides diffusion coefficient, resistance to carbonation and wear. For each trial's findings and analysis results are presented. Finally, there is disclosed the need to implement more concrete performance and durability.

## Contenido

<b>1</b>	<b>JUSTIFICACION</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>17</b>
2.1	GENERAL.....	17
2.2	ESPECÍFICOS .....	17
<b>3</b>	<b>CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO</b> .....	<b>18</b>
3.1	DEFINICIÓN .....	18
3.2	DIFERENCIA ENTRE CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO VS CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.....	19
3.3	RELACIÓN AGUA/MATERIAL CEMENTANTE.....	20
3.4	PROPORCIONES EN LA MEZCLA DE ALTO DESEMPEÑO.....	22
3.5	UTILIZACIÓN DE HUMO DE SÍLICE, CENIZA VOLANTE Y ESCORIA.....	24
3.5.1	<i>Humo de Sílice</i> .....	24
3.5.2	<i>Ceniza Volante</i> .....	26
3.5.3	<i>Escoria</i> .....	27
3.6	TAMAÑO DEL AGREGADO. ....	28
3.7	EL MANEJO Y EL USO DE ADITIVOS FLUIDIFICANTES PARA CONCRETO. ....	29
3.7.1	<i>Agentes reductores de agua:</i> .....	30
3.7.2	<i>Aditivos reductores de agua de alto rango (súper plastificantes o súper fluidificantes):</i> .....	30
3.8	CONTRACCIÓN Y CURADO.....	31
3.9	UTILIZACIÓN.....	32
3.10	DURABILIDAD .....	33
<b>4</b>	<b>SOSTENIBILIDAD</b> .....	<b>34</b>
4.1	MATERIALES Y RECURSOS EN LOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO .....	34
4.1.1	<i>Cementos</i> .....	34
4.1.2	<i>Agregados</i> .....	34
4.1.3	<i>Aditivos</i> .....	35
4.2	RECICLAR AL MÁXIMO POSIBLE .....	35
4.3	SOSTENIBILIDAD, DURABILIDAD Y REUSÓ .....	35
4.4	SITIOS SOSTENIBLES .....	38
4.5	EFICIENCIA Y MANEJO DEL RECURSO DEL AGUA .....	39
4.6	SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN LEED.....	39

---

<b>5</b>	<b>CONTROL DE CALIDAD.....</b>	<b>42</b>
5.1	TIPOS DE CONTROL .....	42
5.1.1	<i>Control de Materiales .....</i>	<i>42</i>
5.1.2	<i>Control de Fabricación .....</i>	<i>43</i>
5.1.3	<i>Control de Recepción .....</i>	<i>44</i>
5.1.4	<i>Control de Instalaciones .....</i>	<i>44</i>
5.1.5	<i>Control de Ejecución. ....</i>	<i>45</i>
<b>6</b>	<b>APLICACIONES .....</b>	<b>45</b>
6.1	APLICACIONES EN LA INGENIERÍA VIAL.....	46
6.2	APLICACIONES EN LA INGENIERÍA GEOTÉCNICA .....	46
6.3	APLICACIONES EN LA INGENIERÍA HIDRÁULICA.....	47
6.4	APLICACIONES EN LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL .....	47
6.4.1	<i>En edificaciones .....</i>	<i>47</i>
6.4.2	<i>Edificaciones que se desarrollaran en los próximos años en el mundo</i>	<i>52</i>
6.4.3	<i>Edificaciones en Colombia .....</i>	<i>55</i>
6.4.4	<i>Puentes .....</i>	<i>59</i>
6.4.5	<i>Prefabricados .....</i>	<i>61</i>
<b>7</b>	<b>CARACTERIZACIÓN AL ALTO DESEMPEÑO .....</b>	<b>63</b>
7.1	PROPIEDADES MECÁNICAS.....	63
7.1.1	<i>Resistencia a Compresión.....</i>	<i>64</i>
7.1.2	<i>Módulo de Elasticidad .....</i>	<i>71</i>
7.2	CARACTERIZACIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS MÁS RELEVANTES DE DURABILIDAD Y ALTO DESEMPEÑO. ....	94
7.2.1	<i>Sortividad.....</i>	<i>95</i>
7.2.2	<i>Permeabilidad.....</i>	<i>104</i>
7.2.3	<i>Penetración Ion Cloruro.....</i>	<i>115</i>
7.2.4	<i>Coeficiente de Difusión.....</i>	<i>119</i>
7.2.5	<i>Resistencia a la Carbonatación del Concreto.....</i>	<i>127</i>
7.2.6	<i>Resistencia a la Abrasión del Concreto.....</i>	<i>140</i>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>146</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>151</b>

## Lista de figuras

FIGURA 1. CICLO DE VIDA DE LA INDUSTRIA DEL CONCRETO.	36
FIGURA 2. A PARTIR DE MATERIAS PRIMAS ALTERNAS, HASTA EL REUSÓ	37
FIGURA 3. SISTEMA INTEGRADO DE LA PRODUCCIÓN DEL CONCRETO	38
FIGURA 4. CONTENIDO DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DEL CONCRETO	39
FIGURA 5. FACTORES QUE IMPLICAN EL SISTEMA LEED	40
FIGURA 6. LOS CONCRETOS SOSTENIBLES SON AUTOCOMPACTABLES, PERMEABLES, ALTA RESISTENCIA, FLEXIBLES, AUTOLIMPIABLES Y TRANSLUCIDOS.	41
FIGURA 7. ACTIVIDADES DE LA INGENIERÍA CIVIL	46
FIGURA 8. GRAFICA DE ALCANCE DE RESISTENCIA A LOS 3 DÍAS	66
FIGURA 9. GRAFICA DE ALCANCE DE RESISTENCIA A LOS 7 DÍAS	67
FIGURA 10. GRAFICA DE ALCANCE DE RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS	69
FIGURA 11. GRAFICA DE ALCANCE DE RESISTENCIA A LOS 56 DÍAS	70
FIGURA 12. CURVA TÍPICA DE ESFUERZOS-DEFORMACIÓN-PRIMERA MUESTRA (21 MPA)	74
FIGURA 13. CURVA TÍPICA DE ESFUERZOS-DEFORMACIÓN-SEGUNDA MUESTRA (21 MPA)	77
FIGURA 14. CURVA TÍPICA DE ESFUERZOS-DEFORMACIÓN-PRIMERA MUESTRA (42 MPA)	79
FIGURA 15. CURVA TÍPICA DE ESFUERZOS-DEFORMACIÓN-SEGUNDA MUESTRA (42 MPA)	82
FIGURA 16. CURVA TÍPICA DE ESFUERZOS-DEFORMACIÓN-PRIMERA MUESTRA (49 MPA)	84
FIGURA 17. CURVA TÍPICA DE ESFUERZOS-DEFORMACIÓN-SEGUNDA MUESTRA (49 MPA)	87
FIGURA 18. CURVA TÍPICA DE ESFUERZOS-DEFORMACIÓN-PRIMERA MUESTRA (56 MPA)	89
FIGURA 19. CURVA TÍPICA DE ESFUERZOS-DEFORMACIÓN-SEGUNDA MUESTRA (56 MPA)	92
FIGURA 20. COMPARACIÓN ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN AGUA/ MATERIAL CEMENTANTE	93
FIGURA 21. TENDENCIA DE ABSORCIÓN PARA MEZCLAS DE 21/42/49/56 MPA	103
FIGURA 22. PERMEABILIDAD DEL CONCRETO VS F´C [MPA]	109
FIGURA 23. PERMEABILIDAD DEL CONCRETO VS RELACIÓN MATERIAL CEMENTANTE A/C	110
FIGURA 24. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD AL AGUA VS RELACIÓN MATERIAL CEMENTANTE A/C (TENDENCIA LINEAL)	114
FIGURA 25. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD AL AGUA VS RELACIÓN MATERIAL CEMENTANTE A/C (TENDENCIA EXPONENCIAL)	114
FIGURA 26. PENETRACIÓN ION CLORURO BASADO EN EL PASO DE CARGA VS F´C [MPA]	117
FIGURA 27. PENETRACIÓN ION CLORURO BASADO EN EL PASO DE CARGA VS RELACIÓN AGUA MATERIAL CEMENTANTE	118
FIGURA 28. PROFUNDIDAD DETECTADA POR COLORIMETRÍA VS F´C [MPA]	122
FIGURA 29. PROFUNDIDAD DETECTADA POR COLORIMETRÍA VS AGUA MATERIAL CEMENTANTE	123
FIGURA 30. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE ION CLORURO DEL CONCRETO VS F´C [MPA]	125
FIGURA 31. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE ION CLORURO DEL CONCRETO VS AGUA MATERIAL CEMENTANTE	126
FIGURA 32. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN D VS RESISTENCIA (MPA)	132
FIGURA 33. COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN K VS RESISTENCIA (MPA)	132
FIGURA 34. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN D VS RELACIÓN AGUA MATERIAL CEMENTANTE	133
FIGURA 35. COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN K VS RELACIÓN AGUA MATERIAL CEMENTANTE	133
FIGURA 36. COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN K VS RESISTENCIA (MPA) A 60 DÍAS DE EXPOSICIÓN	135
FIGURA 37. COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN K VS RELACIÓN AGUA MATERIAL CEMENTANTE A 60 DÍAS DE EXPOSICIÓN	135
FIGURA 38. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN A 30 Y 60 DÍAS DE EXPOSICIÓN VS RESISTENCIA (MPA)	136

FIGURA 39. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN D DE 30 Y 60 DÍAS DE EXPOSICIÓN VS RELACIÓN AGUA MATERIAL CEMENTANTE	137
FIGURA 40. COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN A 30 Y 60 DÍAS DE EXPOSICIÓN VS RESISTENCIA (MPA)	138
FIGURA 41. COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN A 30 Y 60 DÍAS DE EXPOSICIÓN VS RELACIÓN AGUA MATERIAL CEMENTANTE	139
FIGURA 42. LONGITUD DE HUELLA LH VS RESISTENCIA (MPA)	144
FIGURA 43. LONGITUD DE HUELLA LH VS RELACIÓN AGUA MATERIAL CEMENTANTE	145

## Lista de fotografías

FOTOGRAFÍA 1. TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO EMPLEADO EN LAS MEZCLAS.....	29
FOTOGRAFÍA 2. CURADO DE LAS MUESTRAS DE 21, 42, 49 Y 56 MPA .....	32
FOTOGRAFÍA 3. TRUMP INTERNATIONAL HOTEL & TOWER .....	49
FOTOGRAFÍA 4. AL HAMRA TOWER.....	49
FOTOGRAFÍA 5. 23 MARINA.....	50
FOTOGRAFÍA 6. WORLD TRADE CENTER ABU DHABI .....	50
<b>FOTOGRAFÍA 7. ELITE RESIDENCE .....</b>	<b>51</b>
<b>FOTOGRAFÍA 8. JW MARRIOT MARQUIS HOTEL DUBAI TOWER 2 .....</b>	<b>51</b>
FOTOGRAFÍA 9. MERCURY CITY TOWER .....	52
FOTOGRAFÍA 10. KINGDOM TOWER .....	53
FOTOGRAFÍA 11. WEST 57TH STREET .....	53
FOTOGRAFÍA 12. MARINA.....	54
FOTOGRAFÍA 13. PARK AVENUE .....	54
FOTOGRAFÍA 14. OBEROI OASIS TOWER B .....	55
FOTOGRAFÍA 15. OCEAN TOWER CARTAGENA .....	56
FOTOGRAFÍA 16. PALMETTO ELIPTIC .....	57
FOTOGRAFÍA 17. GRAND BAY CLUB .....	58
FOTOGRAFÍA 18. NORTH POINT 3 BOGOTÁ.....	58
FOTOGRAFÍA 19. PUENTE GREAT BELT .....	59
FOTOGRAFÍA 20. PUENTE SUNSHINE SKYWAY .....	60
FOTOGRAFÍA 21. PUENTE ERASMUSBRUG .....	60
FOTOGRAFÍA 22. PUENTE MILLAU .....	61
FOTOGRAFÍA 23. VIGAS PREFABRICADAS.....	62
FOTOGRAFÍA 24. MUROS DE CONTENCIÓN PREFABRICADOS .....	62
FOTOGRAFÍA 25. PLACAS ALVEOLARES PREFABRICADAS.....	63
FOTOGRAFÍA 26. ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS .....	63
FOTOGRAFÍA 27. MONTAJE PARA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	65
FOTOGRAFÍA 28. MONTAJE PARA LA OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	72
FOTOGRAFÍA 29. MONTAJE PARA LA OBTENCIÓN DE LA SORTIVIDAD.....	99
FOTOGRAFÍA 30. MONTAJE PARA LA OBTENCIÓN DE LA PERMEABILIDAD .....	105
FOTOGRAFÍA 31. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA SEGÚN ASTM- C496 .....	106
FOTOGRAFÍA 32. PROFUNDIDAD DE PERMEABILIDAD 21 MPA.....	106
FOTOGRAFÍA 33. PROFUNDIDAD DE PERMEABILIDAD 42 MPA.....	107
FOTOGRAFÍA 34. PROFUNDIDAD DE PERMEABILIDAD 49 MPA.....	107
FOTOGRAFÍA 35. PROFUNDIDAD DE PERMEABILIDAD 56 MPA.....	108
FOTOGRAFÍA 36. MONTAJE PARA LA OBTENCIÓN DE PENETRACIÓN CLORUROS .....	116
FOTOGRAFÍA 37. MONTAJE ENSAYO COEFICIENTE DE DIFUSIÓN .....	119
FOTOGRAFÍA 38. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORURO MEZCLA 21 MPA.....	120
FOTOGRAFÍA 39. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORURO MEZCLA 42 MPA.....	120
FOTOGRAFÍA 40. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORURO MEZCLA 49 MPA.....	121
FOTOGRAFÍA 41. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORURO MEZCLA 56 MPA.....	121
FOTOGRAFÍA 42. CÁMARA DE CARBONATACIÓN.....	128
FOTOGRAFÍA 43. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN 21 MPA.....	129
FOTOGRAFÍA 44. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN 42 MPA.....	129

---

FOTOGRAFÍA 45. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN 49 MPA.....	130
FOTOGRAFÍA 46. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN 56 MPA.....	130
FOTOGRAFÍA 47. MONTAJE PARA LA OBTENCIÓN DEL ENSAYO DE ABRASIÓN.....	141
FOTOGRAFÍA 48. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, LONGITUD DE HUELLA LH (21 MPA) .....	142
FOTOGRAFÍA 49. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, LONGITUD DE HUELLA LH ( 42MPA) .....	142
FOTOGRAFÍA 50. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, LONGITUD DE HUELLA LH ( 49MPA) .....	142
FOTOGRAFÍA 51. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, LONGITUD DE HUELLA LH ( 56MPA) .....	143
FOTOGRAFÍA 52. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN PARA 21,42,49 Y 56 MPA .....	144

## Lista de tablas

TABLA 1. RELACIONES AGUA/MATERIAL CEMENTANTE EMPLEADAS EN LOS ENSAYOS DE ESTE DOCUMENTO .....	21
TABLA 2. DOSIFICACIÓN PARA CONCRETO DE 3000 Psi/21MPA.....	22
TABLA 3. DOSIFICACIÓN PARA CONCRETO DE 6000 Psi/42MPA.....	23
TABLA 4. DOSIFICACIÓN PARA CONCRETO DE 7000 Psi/49MPA.....	23
TABLA 5. DOSIFICACIÓN PARA CONCRETO DE 8000 Psi/56MPA.....	24
TABLA 6. CONTENIDO DE CENIZA PARA LAS DIFERENTES DOSIFICACIONES .....	27
TABLA 7. ADITIVOS EMPLEADOS EN LAS MEZCLAS.....	30
TABLA 8. EDIFICACIONES MÁS IMPONENTES EN EL MUNDO .....	48
TABLA 9. EDIFICACIONES FUTURAS DEL MUNDO .....	52
TABLA 10. EDIFICACIONES MÁS IMPORTANTES EN COLOMBIA.....	56
TABLA 11. ESQUEMA GENERAL MODELO DE ANÁLISIS .....	65
TABLA 12. RESISTENCIA A LOS 3 DÍAS.....	66
TABLA 13. RESISTENCIA A LOS 7 DÍAS.....	67
TABLA 14. RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS.....	68
TABLA 15. RESISTENCIA A LOS 56 DÍAS.....	69
TABLA 16. ESQUEMA PARA MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	71
TABLA 17. MÓDULO DE ELASTICIDAD– PRIMERA MUESTRA (21 MPA) .....	72
TABLA 18. CALCULO MODULO DE ELASTICIDAD- PRIMERA MUESTRA (21MPA).....	73
TABLA 19. MÓDULO DE ELASTICIDAD – SEGUNDA MUESTRA (21 MPA) .....	74
TABLA 20. CALCULO MODULO DE ELASTICIDAD- SEGUNDA MUESTRA (21MPA).....	76
TABLA 21. MÓDULO DE ELASTICIDAD – PRIMERA MUESTRA (42MPA) .....	77
TABLA 22. CALCULO MODULO DE ELASTICIDAD- PRIMERA MUESTRA (42MPA).....	78
TABLA 23. MÓDULO DE ELASTICIDAD – SEGUNDA MUESTRA (42MPA).....	79
TABLA 24. CALCULO MODULO DE ELASTICIDAD- SEGUNDA MUESTRA (42MPA).....	81
TABLA 25. MÓDULO DE ELASTICIDAD – PRIMERA MUESTRA (49MPA) .....	82
TABLA 26. CALCULO MODULO DE ELASTICIDAD- PRIMERA MUESTRA (49MPA).....	83
TABLA 27. MÓDULO DE ELASTICIDAD – SEGUNDA MUESTRA (49MPA) .....	84
TABLA 28. CALCULO MODULO DE ELASTICIDAD- SEGUNDA MUESTRA (49MPA).....	86
TABLA 29. MÓDULO DE ELASTICIDAD – PRIMERA MUESTRA (56MPA) .....	87
TABLA 30. CALCULO MODULO DE ELASTICIDAD- PRIMERA MUESTRA (56MPA).....	88
TABLA 31. MÓDULO DE ELASTICIDAD – SEGUNDA MUESTRA (56MPA) .....	90
TABLA 32. CALCULO MODULO DE ELASTICIDAD-SEGUNDA MUESTRA (56MPA) .....	91
TABLA 33. RESUMEN RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	92
TABLA 34. ESQUEMA DE ENSAYO DE POROSIDAD Y SORTIVIDAD .....	96
TABLA 35. OBTENCIÓN DE LA POROSIDAD PARA 21 MPA .....	97
TABLA 36. OBTENCIÓN DE LA POROSIDAD PARA 42 MPA .....	97
TABLA 37. OBTENCIÓN DE LA POROSIDAD PARA 49 MPA .....	97
TABLA 38. OBTENCIÓN DE LA POROSIDAD PARA 56 MPA .....	98
TABLA 39. RESUMEN DE POROSIDAD DE MEZCLAS 21, 42, 49 Y 56 MPA.....	98
TABLA 40. VARIACIÓN DE PESO POR ABSORCIÓN DE AGUA A TRAVÉS DEL TIEMPO.....	100
TABLA 41. INCREMENTO ( ) DE PESO POR ABSORCIÓN DE AGUA ACUMULADO A TRAVÉS DEL TIEMPO ....	101
TABLA 42. CÁLCULO DE LA ABSORCIÓN DE AGUA .....	102
TABLA 43. PROFUNDIDAD DE PERMEABILIDAD 21 MPA .....	106

---

TABLA 44. PROFUNDIDAD DE PERMEABILIDAD 42 MPA .....	107
TABLA 45. PROFUNDIDAD DE PERMEABILIDAD 49 MPA .....	107
TABLA 46. RESULTADOS DE PROFUNDIDAD DE PERMEABILIDAD 56 MPA .....	108
<b>TABLA 47. RESUMEN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO .....</b>	<b>108</b>
TABLA 48. RELACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO CON EL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Y LA PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN.....	110
TABLA 49. OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD PARA 21 MPA.....	111
TABLA 50. OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD PARA 42 MPA .....	112
TABLA 51. OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD PARA 49 MPA.....	112
TABLA 52. OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD PARA 56 MPA.....	112
TABLA 53. RESUMEN COEFICIENTE PROMEDIO DE PERMEABILIDAD AL AGUA .....	113
TABLA 54. MEDICIÓN DE LA PENETRACIÓN DE CLORUROS A 6 HORAS. ....	116
TABLA 55. PENETRACIÓN ION CLORURO BASADO EN EL PASO DE CARGA.....	117
TABLA 56. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORURO MEZCLA 21 MPA .....	120
TABLA 57. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORURO MEZCLA 42 MPA .....	120
TABLA 58. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORURO MEZCLA 49 MPA .....	121
TABLA 59. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORURO MEZCLA 56 MPA .....	121
TABLA 60. RESUMEN MEDICIÓN DE LA PENETRACIÓN DE CLORUROS A 24 HORAS CON REVELADOR. ....	122
TABLA 61. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE ION CLORURO DEL CONCRETO.....	124
TABLA 62. CORRELACIÓN CÁMARA DE CARBONATACIÓN.....	128
TABLA 63. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN 21 MPA .....	129
TABLA 64. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN 42 MPA .....	129
TABLA 65. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN 49 MPA .....	130
TABLA 66. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN 56 MPA .....	130
TABLA 67. PROFUNDIDAD Y COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN A 30 DÍAS DE EXPOSICIÓN .....	131
TABLA 68. PROFUNDIDAD Y COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN A 60 DÍAS DE EXPOSICIÓN .....	134
TABLA 69. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, LONGITUD DE HUELLA LH ( 21MPA).....	142
TABLA 70. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, LONGITUD DE HUELLA LH ( 42MPA).....	142
TABLA 71. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, LONGITUD DE HUELLA LH ( 49MPA).....	142
TABLA 72. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, LONGITUD DE HUELLA LH ( 56MPA).....	143
TABLA 73. RESUMEN PROMEDIO RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, LONGITUD DE HUELLA LH.....	143

## 1 JUSTIFICACION

La investigación presentada en este documento de tesis buscó incentivar la producción industrial y el uso de concretos de alto desempeño en Colombia, por medio de la identificación de características de las mezclas de concreto que determinan el incremento de ventajas y cualidades de durabilidad y vida útil de las obras civiles.

Tal como señaló Pierre-Claude Aïtcin (2004) el concreto de alto desempeño es un criterio de calidad del concreto que se extendió a partir de la 1970 gracias al desarrollo de nuevos aditivos plastificantes, superfluidificantes e hiperplastificantes que demostraron mejorar las cualidades de manejabilidad y resistencia a la compresión del concreto, además de demandar menos agua en el proceso de producción. En general, se considera que cualquier concreto que muestre cualidades que sobrepasen las del concreto convencional, es un concreto de alto desempeño (Federal Highway Administration, 1994)

El incremento del uso y la producción industrial de concretos de alto desempeño en Colombia aportará a la preservación de las obras civiles, mitigando los agentes meteorológicos de exposición, alargando su vida de servicio, además de la reducción de costos de mantenimiento. Sin embargo prevalecen retos para lograr procesos de producción a gran escala, tales como, logísticas de colocación, protocolos para cumplir con estándares de calidad, preparación de personal calificado que pueda obtener el acopio de materiales y estándares de laboratorio. Todo esto justifica el desarrollo de mayores estudios. Por lo tanto, se apoyara a demostrar la variedad y versatilidad de las aplicaciones del concreto de alto desempeño y la solución de diversos problemas que más allá de las solicitaciones dinámicas y estáticas que requieren las estructuras convencionales, está en mitigar eventos meteorológicos, agentes químicos y ambientales.

---

## 2 OBJETIVO

### 2.1 General

Incentivar la producción industrial para su masificación, con los respectivos controles de uso en obra, logística de colocación de concretos de alto desempeño a través de un riguroso control de calidad, soportado por las normas nacionales e internacionales vigentes y por los controles empíricos y experimentales que se requieran.

### 2.2 Específicos

- Estudiar y caracterizar concretos de alto desempeño con un enfoque práctico a la durabilidad, sostenibilidad y controles de calidad que permitan a la industria colombiana promover su utilización y masificación.
- Elaborar y ensayar proporciones para obtener mezclas con cualidades de alto desempeño, con materias primas de uso común y fácil adquisición. Donde se toman precauciones de curado, compactación, exudación, relaciones agua material cementante, que permitan impulsar su masificación industrial, al demostrar el incremento de ventajas y evidenciar la necesidad de aplicarlas a casos particulares de las estructuras que se desarrollan a nivel nacional.
- Definir los campos de aplicación que el mundo actual ha desarrollado con este tipo de tecnología de concreto y la proyección a futuro con las exigencias que implica la sostenibilidad en el mundo para preservar los recursos naturales, el uso óptimo de los mismos y los nuevos retos que permitan mejorar el material actual.
- Comparar cualidades que permitan determinar ventajas particulares aplicables a proyectos, con el conocimiento de la susceptibilidad al tipo de deterioro que se asume por la absorción, permeabilidad al agua, permeabilidad a cloruros, carbonatación, entre otros.

### 3 CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO

#### 3.1 Definición

Los concretos de alto desempeño son concretos que tienen un mejor comportamiento para una aplicación en particular. Este comportamiento se mide con características a diferentes edades del concreto, más allá de la resistencia, incide en propiedades del material, como es: módulo de elasticidad, densidad, permeabilidad, absorción, ion cloruros, coeficientes de difusión, carbonatación y abrasión.

Esta clase de concretos en su mayoría no se alcanzan con el uso de materiales convencionales y sus requisitos involucran mejoras de colocación, compactación sin segregación, propiedades mecánicas a largo plazo, resistencia a edades tempranas, rigidez, estabilidad volumétrica, vida de servicio y durabilidad.

Alguna diferencia de materiales que se utilizan para producir concretos de alto desempeño encontramos:

- El aumento de contenidos de cemento y aditivos reductores de agua
- Uso de otros aditivos químicos o minerales, tales como la micro sílice, ceniza volante y escoria de alto horno

Para producir concretos de alto desempeño deben existir actividades integradas con procesos estandarizados de calidad, desde la obtención de sus insumos, dosificación y precauciones durante los procesos de colocación y curado, ya que el manejo del concreto modifica su desempeño después de fraguado.

El comité del ACI encargado del concreto de alto desempeño lo define como aquel que satisface los siguientes requisitos especiales de comportamiento y uniformidad:

- Facilidad de colocación y acabado sin segregación.
- Propiedades mecánicas a largo plazo.
- Desarrollo de resistencia a edades tempranas.
- Ductilidad.
- Estabilidad volumétrica.
- Larga vida de servicio en condiciones ambientales severas.

Las propiedades típicas de los concretos de alto desempeño pueden involucrar alta resistencia a la compresión, alto módulo de elasticidad, así como manejabilidad y larga vida de servicio en condiciones medioambientales severas. No se puede afirmar que concretos con resistencias a la compresión inferiores a 42MPa tengan un mal desempeño; el alto desempeño identifica el incremento de cualidades que favorecen a un tipo de estructura, sometida a sollicitaciones específicas de diseño estructural y preservación en el tiempo.

En el medio colombiano las obras se construyen con concreto de resistencia a la compresión normal de 21MPa. Se piensa que es un concreto económico y que equivocadamente satisface los requerimientos de cualquier tipo de obra. Concretos con mayor desempeño que el de 21 MPa, pueden significar un proceso de adaptación a estructuras sostenibles y duraderas en el tiempo que no requerirán mayor inversión en mantenimiento.

### **3.2 Diferencia entre concreto de alto desempeño vs concreto de alta resistencia.**

El concreto tiene una variedad de propiedades que se pueden mejorar de acuerdo al proyecto, las cuales se pueden dividir en tres grandes categorías:

- Incrementar las propiedades mecánicas como la resistencia y el módulo de elasticidad
- Desarrollo de propiedades no mecánicas como durabilidad
- Perfeccionamiento del proceso constructivo de colocación y compactación

A diferencia de los concretos que buscan la alta resistencia, los concretos de alto desempeño son diseñados para satisfacer los requerimientos de los proyectos con una, con dos o las tres categorías mencionadas. Los concretos de alto desempeño buscan cumplir con requisitos de uniformidad que difícilmente se pueden alcanzar rutinariamente con el uso de materiales convencionales y prácticas normales de mezclado, colocación y curado. Con el alto desempeño se busca obtener un material que en estado fresco presente manejabilidad, por razones económicas y calidad constructiva y que en estado endurecido se comporte como una mezcla homogénea, con elevada compacidad, estabilidad y durabilidad.

Las características antes mencionadas traen como consecuencia, que en la mayoría de los casos, se alcance la alta resistencia. Por lo tanto si un concreto de alto desempeño es normalmente un concreto de alta resistencia, no necesariamente debe satisfacer esta condición, pero si utiliza una adecuada

---

tecnología de elaboración, colocación y curado, es posible lograr integrar ambas propiedades.

El hecho de buscar un elevado nivel de resistencia trae como consecuencia diversos factores, como el empleo de materiales seleccionados y bajas relaciones agua/material cementante, que propicia una estructura menos porosa, de baja permeabilidad, más durable, logrando así la condición de los concretos de alto desempeño. Existen casos en los cuales un concreto de alta resistencia al no tomarse las medidas necesarias, no alcanza un alto desempeño.

Para obtener bajas relaciones agua /material cementante y por consiguiente alta resistencia y desempeño, requiere el uso de aditivos fluidificantes que reducen considerablemente la cantidad de agua, conservando o incrementando su fluidez. Al igual que la incorporación de adiciones minerales, como las cenizas volantes (fly ash) y, sobre todo, el humo del sílice (silica fume), permitirá una mayor obturación de poros y un mejoramiento de la interface matriz-agregado, aumentando así la capacidad de la mezcla.

El empleo de concretos de alta resistencia y de alto desempeño permiten estructuras innovadoras, con mayor calidad, durables y de alto rendimiento constructivo; gracias a las adiciones minerales, aditivos fluidificantes y reductores de agua de alto rango.

### **3.3 Relación Agua/Material Cementante.**

La mayor parte de las propiedades que se desean para el concreto dependen de la calidad de la dosificación de la mezcla y el primer paso consiste en la selección óptima de la relación agua/material cementante, los cuales se basan en dos criterios: resistencia y durabilidad. Sin embargo es importante que la relación agua/ material cementante, con base a la resistencia, posea un comportamiento durable ante las condiciones de exposición.

La relación de agua material cementante incide en los coeficientes de retracción y de fluencia, determinando la estructura interna del concreto. Cuanto mayor sea la existencia de agua en exceso habrá mayor cantidad de capilares y son tan numerosos que están unidos entre sí formando una red permeable en el concreto.

La porosidad incrementada debido a un aumento de la relación agua / material cementante acarrea una disminución de la compacidad y en consecuencia de la resistencia del concreto. Un material compacto que absorba pocos gases o líquidos agresivos debe naturalmente ser más durable. La relación agua / material cementante crece cuando aumenta la cantidad de agua y decrece cuando

aumenta el contenido del material cementante. En todos los casos, cuanto más baja es la relación agua / material cementante tanto más favorables son las propiedades del concreto.

Las relaciones agua/ material cementante deben satisfacer uno de los principales requisitos del concreto en estado fresco: La manejabilidad. En las mezclas de concreto de alto desempeño, para satisfacer este requisito aplican aditivos plastificantes y se recomiendan asentamientos de 25 a 50 mm previamente a su aplicación. Las relaciones agua/material cementante requeridas para lograr un determinado asentamiento varían en función de la finura de los componentes de la mezcla; por eso, cuando se usa humo de sílice (que posee una finura mucho mayor que las cenizas volantes) se deben usar grandes cantidades de aditivo plastificante para lograr la manejabilidad requerida. Otro factor es la calidad y proporción de los agregados, ya que agregados mal gradados o con partículas alargadas producen mayores requerimientos de agua. También algunos cementos o combinaciones de material cementante más aditivo pueden ocasionar pérdidas de fluidez. Adicionalmente, puede ser útil para el mejoramiento de la manejabilidad mantener baja la humedad de los agregados, con el fin de que la mayoría del agua de mezcla aporte a la manejabilidad y no se encuentre contenida en la humedad de los agregados.

**Tabla 1. Relaciones agua/material cementante empleadas en los ensayos de este documento**

<b>a/mc</b>	<b>MPa</b>	<b>PSI</b>
0.67	21	3000
0.43	42	6000
0.38	49	7000
0.33	56	8000

La Tabla 1, se observan relaciones del orden de 0.33 a 0.67 de agua/material cementante, relaciones empleadas para los ensayos de este documento. Por medio de la relación agua material cementante se determina las ventajas que permiten obtener altas resistencias correlacionadas a la durabilidad y desempeño de los concretos. Es recomendable el uso de relaciones agua/material cementante inferior a 0.4 donde se controla la estructura interna del concreto y por consiguiente la susceptibilidad ante agentes externos.

### 3.4 Proporciones en la Mezcla de Alto Desempeño.

En el proceso de diseño de mezclas de concreto de alto desempeño las proporciones varían dependiendo de factores como las edades de ensayo, el tipo de aplicación, las características de los materiales, el nivel de esfuerzo requerido, requisitos económicos, estructurales, prácticas de construcción, el ambiente de curado, entre otros factores, que inciden sobre la selección de la dosificación de la mezcla.

Es necesario realizar una serie de mezclas de ensayo que permitan abarcar un rango apropiado de proporciones de cada material; los ensayos realizados son válidos únicamente para los materiales con los que se han realizado y no se puede extrapolar directamente a otra mezcla. Se resalta que para obtener este tipo de concretos se requiere las mejores prácticas de construcción como los más estrictos requisitos de control de calidad.

Después de una serie de ensayos de prueba, se determinaron las dosificaciones para la obtención de las diferentes resistencias a evaluar en este documento, Véase (Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5), en la que se destaca su relación agua/material cementante, agregados, contenidos de ceniza, aditivo y parámetros de manejabilidad.

**Tabla 2. Dosificación para concreto de 3000 Psi/21MPa**

FLUIDO	3000 Psi
A/MC	0.674
ARENA/AGREGADO	0.489

COMPONENTES DEL DISEÑO POR m3								
MATERIALES	CEMENTO (Kg)	CENIZA (kg)	ARENA 1 (kg)	ARENA 2 (kg)	GRAVA 1 (kg)	AGUA	ADITIVO 1cc	ADITIVO 2cc
CANTIDAD	260.00	65.00	653.14	163.28	853.16	219	0.51%	
DENSIDAD	3.12	2.09	2.62	2.57	2.445			
PROCEDENCIA	CPR T-III	CENIZA	SALDANA	ROZO	CONAGRE	ACUEDUCTO	AD20	

VOLUMEN DE MEZCLA (LITROS)				
MATERIAL	PESO(Kg)	%HUMEDAD	%ABSORCION	PESO CORREGIDO(Kg)
CEMENTO(kg)	6.53			6.53
CENIZA (kg)	1.63			1.63
ARENA 1	16.41	7.67%	1.00%	17.67
ARENA 2	4.10	3.00%	1.00%	4.23
GRAVA 1	21.44	1.33%	3.07%	21.72
AGUA	5.50			4.70
AD20	0.04			41.73
VISCOCRETE				

ESTADO FRESCO	
% AIRE	1 3
ASENTAMIENTO INICIAL	9"
RENDIMIENTO VOLUMETRICO	19,640

**Tabla 3. Dosificación para concreto de 6000 Psi/42MPa**

FLUIDO	6000 PSI
A/MC	0.425
ARENA/AGREGADO	0.448

COMPONENTES DEL DISEÑO POR m3								
MATERIALES	CEMENTO (Kg)	CENIZA (kg)	ARENA 1 (kg)	ARENA 2 (kg)	GRAVA 1 (kg)	AGUA	ADITIVO 1cc	ADITIVO 2cc
CANTIDAD	327.20	81.80	611.79	152.94	942.26	174	0.45%	0.60%
DENSIDAD	3.12	2.09	2.62	2.57	2.445			
PROCEDENCIA	CPR T-III	CENIZA	SALDAÑA	ROZO	CONAGRE	ACUEDUCTO	AD20	VISCOCRETE

VOLUMEN DE MEZCLA (LITROS)				
MATERIAL	PESO(Kg)	%HUMEDAD	%ABSORCION	PESO CORREG(Kg)
CEMENTO(kg)	8.22			8.22
CENIZA (kg)	2.06			2.06
ARENA 1	15.37	7.67%	1.00%	16.55
ARENA 2	3.84	3.00%	1.00%	3.96
GRAVA 1	23.67	1.33%	3.07%	23.99
AGUA	4.37			3.68
AD20	0.05			46.24
VISCOCRETE	0.06			61.66

ESTADO FRESCO	
% AIRE	1.4%
ASENTAMIENTO INICIAL	10.5"
RENDIMIENTO VOLUMETRICO	20.20 gr

**Tabla 4. Dosificación para concreto de 7000 Psi/49MPa**

FLUIDO	7000 PSI
A/MC	0.377
ARENA/AGREGADO	0.435

COMPONENTES DEL DISEÑO POR m3								
MATERIALES	CEMENTO (Kg)	CENIZA (kg)	ARENA 1 (kg)	ARENA 2 (kg)	GRAVA 1 (kg)	AGUA	ADITIVO 1cc	ADITIVO 2cc
CANTIDAD	369.23	92.31	576.35	144.09	935.74	174	0.45%	0.60%
DENSIDAD	3.12	2.09	2.62	2.57	2.445			
PROCEDENCIA	CPR T-III	CENIZA	SALDAÑA	ROZO	CONAGRE	ACUEDUCTO	AD20	VISCOCRETE

VOLUMEN DE MEZCLA (LITROS)				
MATERIAL	PESO(Kg)	%HUMEDAD	%ABSORCION	PESO CORREGIDO (Kg)
CEMENTO(kg)	9.28			9.28
CENIZA (kg)	2.32			2.32
ARENA 1	14.48	8.30%	1.00%	15.68
ARENA 2	3.62	5.00%	1.00%	3.80
GRAVA 1	23.51	1.60%	3.07%	23.89
AGUA	4.37			3.52
AD20	0.05			52.18
VISCOCRETE	0.07			69.58

ESTADO FRESCO	
% AIRE	1.2%
ASENTAMIENTO INICIAL	9 1/2"
RENDIMIENTO VOLUMETRICO	19.560 gr

**Tabla 5. Dosificación para concreto de 8000 Psi/56MPa**

FLUIDO	8000 PSI
A/MC	0.330
ARENA/AGREGADO	0.422

COMPONENTES DEL DISEÑO POR m3								
MATERIALES	CEMENTO (Kg)	CENIZA (kg)	ARENA 1 (kg)	ARENA 2 (kg)	GRAVA 1 (kg)	AGUA	ADITIVO 1cc	ADITIVO 2cc
CANTIDAD	421.82	105.45	539.03	134.75	922.86	174	0.45%	0.60%
DENSIDAD	3.12	2.09	2.62	2.57	2.445			
PROCEDENCIA	CPR T-III	CENIZA	SALDAÑA	ROZO	CONAGRE	ACUEDUCTO	AD20	VISCOCRETE

VOLUMEN DE MEZCLA (LITROS)				
MATERIAL	PESO(Kg)	%HUMEDAD	%ABSORCION	PESO CORREG(Kg)
CEMENTO(kg)	10.60			10.60
CENIZA (kg)	2.65			2.65
ARENA 1	13.54	8.30%	1.00%	14.67
ARENA 2	3.39	4.53%	1.00%	3.55
GRAVA 1	23.19	1.01%	3.07%	23.56
AGUA	4.37			3.59
AD20	0.06			59.62
VISCOCRETE	0.08			79.49

ESTADO FRESCO	
% AIRE	0.60%
ASENTAMIENTO INICIAL	10 1/2
RENDIMIENTO VOLUMETRICO	19.460 gr

En estas proporciones se puede destacar que para obtener mayor resistencia se requiere mayor contenido de cemento y ceniza, con una relación de agua material cementante, arena y agregado bajas. De igual manera al incrementar resistencia de la mezcla requiere el uso de aditivos que permitan la manejabilidad del concreto.

### 3.5 Utilización de humo de sílice, ceniza volante y escoria.

Las adiciones minerales, como el humo de sílice, ceniza volante y escoria, se usan en la producción de concretos de alto desempeño. Estas adiciones minerales son muy finas y químicamente reactivas, las cuales logran llenar la micro estructura conformada por agregados y cemento, mejorando la capacidad y las propiedades geológicas de la mezcla.

#### 3.5.1 Humo de Sílice

El humo de sílice procede de la fabricación de silicio y ferro silicio en hornos eléctricos de arco a partir de la reducción de cuarzo de alta pureza. El humo de sílice está compuesto por dióxido de sílice, carbón, azufre, óxidos de aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio.

El humo de sílice se caracteriza por estar constituido de partículas muy finas, de forma vítrea de tamaño menor a 1µm. La proporción del humo de sílice está en función de la cantidad de sílice activa en la mezcla y de cal liberada durante la hidratación del cemento, un exceso de adición actúa únicamente como llenante dando lugar a una mayor demanda de agua y de plastificantes. Normalmente el contenido de humo de sílice en el concreto de alto desempeño está entre 5 y 15 %, aunque debe determinarse exactamente con ensayos que involucren los materiales usados en obra

Con la finalidad de no utilizar altas dosificaciones de cemento, que se traducen en aumento de temperatura del concreto, a veces se recurre a la sustitución de parte del cemento por humo de sílice dada la gran eficacia de esta adición. Su implementación genera un incremento de la demanda de agua debido a su alta superficie específica donde generalmente se utiliza plastificantes con el fin de obtener la máxima manejabilidad y mantener relaciones agua/ material cementante bajas.

El humo de sílice y las adiciones que contienen humo de sílice en el concreto de alto desempeño contribuyen a:

- Mejorar la manejabilidad
- Reducir la permeabilidad y el sangrado gracias a la alta cohesión de la mezcla
- Mejorar la adherencia entre la pasta y los agregados
- Aumentar la resistencia del concreto
- Disminuir la reacción álcali-agregado

El empleo de humo de sílice en el concreto de alto desempeño es especialmente útil para las siguientes aplicaciones:

- Propósitos estructurales y de reparación. (concretos impermeables y resistente a la abrasión)
- Aplicaciones superficiales (limita el ingreso de agua y agentes químicos agresivos)

Uno de los mayores inconvenientes de la incorporación de humo de sílice en el concreto de alto desempeño es la tendencia a desarrollar fisuras por retracción plástica, debido a la gran demanda de agua que esta posee en contraste con las bajas relaciones agua/material cementante del concreto, donde es necesario curar y cubrir la superficie.

### 3.5.2 Ceniza Volante

Las cenizas volantes son residuos sólidos, recogidos por precipitación electrostática o por captación mecánica, que acompañan a los gases emanados durante la combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados.

Las cenizas volantes están compuestas por óxido de sílice, aluminio, hierro, álcalis y pequeños porcentajes de óxido de calcio, magnesio y titanio. Es un polvo constituido por diminutas partículas vítreas. Las cenizas volantes poseen poca o ninguna propiedad cementante, pero en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio, formando compuestos que poseen propiedades cementantes.

Las cenizas volantes en el concreto de alto desempeño, tanto en estado fresco como en estado endurecido, contribuyen a:

- Mejorar la manejabilidad debido al gran contenido de partículas finas y su efecto lubricante.
- Reducir el sangrado y la segregación gracias al tamaño de sus partículas generando un efecto cohesivo.
- Incrementar las resistencias a largo plazo debido a continuas reacciones químicas entre los componentes activos de la ceniza y el hidróxido de calcio producido durante la hidratación del cemento.
- Disminuir la retracción de secado debida en parte a la baja demanda de agua de las cenizas.
- Disminuir el calor de hidratación debido a la lenta velocidad de reacción de las cenizas
- Reducir la porosidad y la permeabilidad debido al efecto llenante de sus partículas y de los productos de la reacción entre esta y el hidróxido de calcio del cemento
- Incrementar la resistencia al ataque de sulfatos y penetración de cloruros debido a la reducción de la permeabilidad.
- Incrementar levemente la ductilidad del concreto y mejorar la interface pasta- agregado.

**Tabla 6. Contenido de ceniza para las diferentes dosificaciones**

FLUIDO	3000 PSi	FLUIDO	6000 PSi
A/MC	0.674	A/MC	0.425
ARENA/AGREGADO	0.489	ARENA/AGREGADO	0.448
MATERIAL	PESO(Kg)	MATERIAL	PESO(Kg)
CEMENTO	6.53	CEMENTO	8.22
CENIZA	1.63	CENIZA	2.06
ARENA 1	16.41	ARENA 1	15.37
ARENA 2	4.10	ARENA 2	3.84
GRAVA 1	21.44	GRAVA 1	23.67
AGUA	5.50	AGUA	4.37

FLUIDO	7000 PSi	FLUIDO	8000 PSi
A/MC	0.377	A/MC	0.330
ARENA/AGREGADO	0.435	ARENA/AGREGADO	0.422
MATERIAL	PESO(Kg)	MATERIAL	PESO(Kg)
CEMENTO	9.28	CEMENTO	10.60
CENIZA	2.32	CENIZA	2.65
ARENA 1	14.48	ARENA 1	13.54
ARENA 2	3.62	ARENA 2	3.39
GRAVA 1	23.51	GRAVA 1	23.19
AGUA	4.37	AGUA	4.37

La dosificación de ceniza volante del presente trabajo se registra en la Tabla 6. En la cual se observa que a medida que aumenta la resistencia se requiere mayor contenido de cemento y de igual manera de ceniza volante. En estas proporciones al existir mayor contenido de finos se requerirá mantener la relación agua material cementante con la implementación de aditivos.

### 3.5.3 Escoria

La escoria es un material granular no metálico formado durante la fundición del acero, durante el enfriamiento del residuo de carbón pulverizado y su procesamiento. Está compuesta por silicatos, aluminosilicatos de calcio y otras bases.

El potencial cementante de la escoria se activa cuando el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento reacciona.

El uso de escorias en concreto de alto desempeño proporciona las siguientes ventajas:

- La escoria permite que la pasta absorba muy poca agua durante el mezclado
- Mejora las resistencias a largo plazo y el módulo de elasticidad
- Disminuye la permeabilidad
- Reduce la temperatura del calor de hidratación
- Disminuye el costo del concreto como resultado de una significativa reducción de dosis de plastificantes.

La escoria es aplicable en:

- Losas
- Cimentaciones
- Prefabricados

### **3.6 Tamaño del Agregado.**

Las mayores resistencias se producen con menores tamaños máximos de agregado para una relación agua/ material cementante dada, debido en parte a la mejor adherencia que presenta este con la pasta de cemento; sin embargo, se ha encontrado que el módulo de elasticidad del concreto no es directamente proporcional a la resistencia, y que depende en gran medida de las propiedades del agregado y de sus proporciones dentro de la mezcla. Así, cuando se desea aumentar el módulo de elasticidad, disminuir la fluencia lenta y la retracción de secado, es conveniente utilizar la mayor cantidad de agregado, así como el mayor tamaño máximo nominal posible.

El tamaño máximo del agregado es un factor determinante en la optimización de la resistencia desarrollada por el concreto. Para altos niveles de resistencia, se recomienda usar tamaños máximos de 9 a 12 mm ( $3/8"$  a  $1/2"$ ), aunque muchos afirman que es posible obtener resistencias superiores a los 69 MPa (10000 psi) usando tamaño máximo nominal de 25.4 mm (1.0") cuando la mezcla se proporciona con aditivos químicos y agregados seleccionados.

Debe tenerse en cuenta que el tamaño máximo del agregado debe ser menor que  $1/5$  de la dimensión mínima entre los lados de las formaletas,  $1/3$  del espesor de las losas,  $3/4$  del espaciamiento libre mínimo entre las barras o alambres individuales del refuerzo, paquetes de barras o los tendones o ductos de preesforzado, de acuerdo con lo expuesto en la norma NSR-10.

### **Fotografía 1. Tamaño máximo del agregado empleado en las mezclas**



El tamaño empleado en la dosificación de las mezclas del presente documento está alrededor 12mm y 20mm. Véase (Fotografía 1).

### **3.7 El manejo y el uso de aditivos fluidificantes para concreto.**

Los aditivos son productos que se incorporan al concreto antes o durante el mezclado en cantidades generalmente pequeñas, con el fin de obtener las propiedades deseadas. Estas sustancias modifican determinadas características del concreto en estado fresco y endurecido, como:

- Tiempo de fraguado, calor de hidratación y resistencia inicial de la pasta de cemento.
- Manejabilidad, reducción de agua, exudación y segregación en estado fresco.
- Resistencia, impermeabilidad y durabilidad en estado endurecido.

Los aditivos proporcionan:

- Buena manejabilidad y durabilidad del concreto
- No variar sustancialmente la dosificación básica
- Incremento significativo de la resistencia a compresión
- Controlar la tasa de endurecimiento

Tipos de aditivos:

- Reductor de agua
- Retardante
- Acelerante
- Reductor de agua y retardante
- Reductor de agua y acelerante

- Reductor de agua de alto rango (plastificante)
- Reductor de agua de alto rango y retardante

De estos tipos de aditivos se extiende, entre los más importantes, los agentes reductores de agua.

### 3.7.1 Agentes reductores de agua:

Su función en el concreto de alto desempeño es:

- Mejorar la manejabilidad en presencia de una relación agua/ material cementante constante
- Conservar el nivel de manejabilidad, reduciendo la cantidad de agua necesaria

Se debe verificar la compatibilidad entre los constituyentes y los aditivos, sobre todo en el caso de las dosificaciones elevadas o cuando se trabaja con más de un aditivo simultáneamente. El incremento de la dosis por encima de lo normal, generalmente, incrementa la resistencia a edades tempranas y puede persistir durante un tiempo.

### 3.7.2 Aditivos reductores de agua de alto rango (súper plastificantes o súper fluidificantes):

Son materiales que han permitido el desarrollado de los concretos de alto desempeño hasta los niveles actuales. Estos aditivos son ampliamente usados para aumentar la manejabilidad de la mezcla y reducir el contenido de agua del concreto (12 a 25 %) manteniendo la misma consistencia. Ambos efectos se traducen en una estructura menos porosa y en un incremento de resistencia y durabilidad.

**Tabla 7. Aditivos empleados en las mezclas**

3000 PSi		6000 PSi	
FLUIDO		FLUIDO	
A/MC	0.674	A/MC	0.425
ARENA/AGREGADO	0.489	ARENA/AGREGADO	0.448
AD20 (gr)	40	AD20 (gr)	50
		VISCOCRETE (gr)	60

FLUIDO	7000 PSi	FLUIDO	8000 PSi
A/MC	0.377	A/MC	0.330
ARENA/AGREGADO	0.435	ARENA/AGREGADO	0.422
AD20 (gr)	50	AD20 (gr)	60
VISCOCRETE (gr)	70	VISCOCRETE (gr)	80

La Tabla 7 destaca el tipo de aditivos empleados en las mezclas de ensayo del presente documento. A Modo general, el AD20 es retardador del tiempo de fraguado del concreto y reductor de agua, por su parte, el VISCOCRETE es un reductor de agua de ultra alto rango.

### 3.8 Contracción y Curado.

El proceso de curado se encuentra entre los factores más importantes para asegurar la Integridad de una estructura que ha sido bien diseñada y hecha con un concreto de buena calidad. Curar el concreto es mantener en el material las condiciones de humedad y temperatura que garanticen la completa hidratación del cementante y el desarrollo de su resistencia potencial.

El curado temprano de las estructuras es un método apropiado para evitar fisuras por contracción plástica y por contracción de secado. El curado de una estructura de concreto debe iniciarse tan pronto sea posible, generalmente cuando el material se ha vuelto rígido, a causa de su fraguado inicial.

El cambio del aspecto brillante a mate anuncia que la evaporación del agua ha llegado a un punto en que debe ser controlada. Una baja humedad relativa combinada con alta temperatura ambiente y alta velocidad del viento obligarán a extremar las necesidades de curado y a prolongarlo.

El mejor método de curado lo constituye la aspersión de agua fría sobre su superficie, una vez el concreto ha fraguado.

## Fotografía 2. Curado de las muestras de 21, 42, 49 y 56 MPa



En la Fotografía 2, se observa el curado de las muestras 21, 42, 49 y 56 MPa, ensayadas en este documento, que mantiene en el material las condiciones de humedad y temperatura ideales para desarrollar su resistencia y desempeño.

### 3.9 Utilización

Una vez que el concreto está en la obra, se debe transportar el material cerca de su posición final de colocación, para esto hay distintos métodos y equipos, cuyo uso depende del tipo, tamaño y de las condiciones específicas de la obra.

La colocación en obra del concreto de alto desempeño se puede realizar mediante los mismos procedimientos usados para la colocación del concreto convencional, teniendo en cuenta entre otros factores el tiempo de manipulación, que puede ser menor que el de un concreto convencional, la mayor fluidez, debida principalmente al uso de aditivos súper plastificantes, menor tamaño máximo de agregado, mayores cantidades de cemento, lo que permite al concreto de alto desempeño un menor grado de segregación, la posibilidad de mayores cantidades de colocación desde mayores alturas. Se debe hacer una planeación óptima de las actividades revisando las especificaciones técnicas, planeando factores como la llegada del concreto, transporte y manejo, teniendo en cuenta los posibles imprevistos que se puedan presentar en obra.

La selección del equipo de colocación del concreto debe permitir una colocación y manejo rápido y eficiente del material. Debe preverse la capacidad y velocidad de

los equipos para la colocación manteniendo la fluidez, la relación agua/material cementante, homogeneidad, etc. Se debe disponer de equipos en buenas condiciones, junto con unidades de reemplazo, especialmente los vibradores, para evitar demoras o paradas que pueden afectar la calidad de la estructura.

### **3.10 Durabilidad**

La durabilidad es la capacidad de la mezcla ya endurecida de soportar sin deteriorarse, las solicitaciones provocadas por agentes físicos y químicos, que pueden agredir al concreto, no solo en su superficie, sino también en el interior de la masa.

La durabilidad de un concreto de alto desempeño se mide en la resistencia que presenta frente a la acción de agentes agresivos, tanto físicos como biológicos, conservando su funcionalidad por periodos de vida útil prolongados con costos de reparación y mantenimiento mínimos.

La elevada resistencia de los concretos de alto desempeño es considerada una de las características principales de este material pero no la más relevante; la durabilidad es uno de los parámetros que exigen las estructuras actuales, que impactan económicamente y orientan a la sostenibilidad del entorno como compromiso ambiental.

La durabilidad se ve amenazada por agentes agresivos que pueden estar en estado gaseoso (aire, vapor de agua, etc.) y líquido (agua, disoluciones salinas, etc.) que pueden penetrar el concreto mediante diferentes tipos de transporte.

- Permeabilidad por la aplicación de una cabeza de presión (Véase ensayo de permeabilidad, sección 7.2.2).
- Difusión debido a una diferencia de concentraciones (Véase ensayo de difusión y ion cloruros, sección 7.2.4).
- Absorción capilar (Véase ensayo de sortividad, sección 7.2.1).
- Desgaste (Véase ensayo de abrasión, sección 7.2.6)

Las investigaciones orientadas a la durabilidad han permitido conocer la necesidad de reducir la porosidad que conlleva a la impermeabilidad del concreto, obturando los espacios intersticiales con el uso de adiciones minerales como cenizas volantes, humo de sílice y escorias, adicionalmente se requiere que las relaciones agua material cementante sean bajas y que existan procesos integrados de

---

colocación, curado y compactación, donde cada una de estas etapas determinan el grado de durabilidad y vida útil de las estructuras.

## **4 SOSTENIBILIDAD**

La sostenibilidad está orientada al compromiso ambiental que implica el uso eficiente de la energía, del agua, los recursos y los materiales no perjudiciales para el medio ambiente. Se ha propagado el término de construcciones sostenibles que cuenta con el entorno y la manera como se integra para formar las ciudades.

Los concretos de alto desempeño están orientando esfuerzos hacia el reciclaje, la reutilización, la recuperación de materiales y uso eficiente de los recursos, que le permita ser sostenible en el tiempo.

### **4.1 Materiales y Recursos en los concretos de alto desempeño**

A continuación se listan algunos materiales y recursos que influyen en la sostenibilidad de la producción de concretos de alto desempeño en el mundo.

#### **4.1.1 Cementos**

Para la producción de clinker, la industria del cemento reemplaza cada vez más los combustibles tradicionales por materiales de sustitución apropiados. La razón de esto son las emisiones, el elevado costo de los combustibles y los esfuerzos tendientes a utilizar los recursos de manera cada vez más razonable. Al mismo tiempo, se ha reducido su transporte y la extracción de materias primas no renovables.

#### **4.1.2 Agregados**

Estas reservas disminuyen continuamente, solamente 1% de la cantidad extraída cada año para la construcción, se reemplaza por procesos naturales. Sin embargo, a favor de la sostenibilidad en la construcción se ha incentivado:

- Recuperación de agregados de concreto.
- Agregados de concreto que sirven como materiales de construcción de reciclaje
- Utilización de materiales triturados provenientes de perforaciones ( túneles )

### **4.1.3 Aditivos**

Los aditivos son materiales agregados a los concretos durante el mezclado y que sirven para modificar las propiedades de estos concretos en los estados fresco y endurecido. De estos aditivos el 76% son fluidificantes. De acuerdo con los conocimientos actuales, los fluidificantes casi no amenazan al medio ambiente. Puesto que los aditivos son fácilmente solubles en el agua, no hay que temer su concentración en los suelos, los conductores del agua subterránea y los organismos. De todas maneras se debe seguir incentivando en la exploración de aditivos minerales naturales que disminuyan las concentraciones de estos aditivos químicos.

### **4.2 Reciclar al Máximo Posible**

En los desechos de cantera, aumenta el porcentaje de concreto que se transforma en agregado de concreto. Los agregados de concreto se utilizan tanto no aglomerados (reemplazo de arena y grava) como aglomerados (concreto). Sus principales usos son, actualmente:

- Reemplazo de arenas y gravas en su forma no aglomerada.
- Concreto pobre
- Sustitución de los agregados naturales para los concretos de construcción.

Los agregados vírgenes usados para preparar el concreto son un recurso en disminución, por lo cual se ha implementado la trituración del concreto (y escombros) en las plantas, a través de la demolición y el procesamiento. La ingeniería del reciclado del concreto es importante debido a los cambios en la planificación y usos de las construcciones.

Por lo tanto el uso de agregados reciclados permite evitar problemas de contaminación ambiental, por materiales residuales de demolición. Reduciendo costos de combustibles y emisiones de CO<sub>2</sub>, ahorro de energía, menor consumo de materiales no renovables. El concreto triturado, se utiliza como parte del agregado grueso natural.

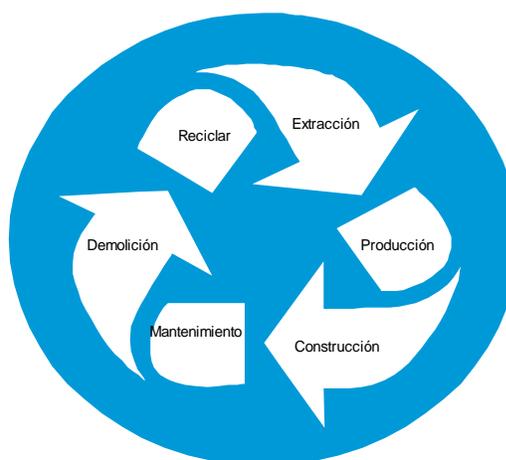
### **4.3 Sostenibilidad, Durabilidad y Reusó**

Se habla de sostenibilidad desde hace mucho tiempo, sin embargo actualmente es un tema prioritario para la industria del concreto de alto desempeño:

- La adquisición de las materias primas, incluyendo el agua para el concreto van a ser limitadas en el futuro.
- Las comunidades presionan a las industrias para que sean más cuidadosas con el medio ambiente.
- Los inversionistas considerarán colocar su capital en las industrias que tengan programas de sostenibilidad
- La educación en este tema hará que los empleados busquen empresas comprometidas con la sostenibilidad.

Dentro de los proyectos sostenibles se debe expresar la durabilidad analizando el ciclo de vida de la industria del concreto. Véase (Figura 1).

**Figura 1. Ciclo de vida de la industria del concreto.**



El ciclo de vida del concreto debe orientarse desde la extracción de materias primas a la reutilización de las mismas para favorecer la sostenibilidad, durabilidad y reusó. El ciclo de vida del concreto incluye las fases de:

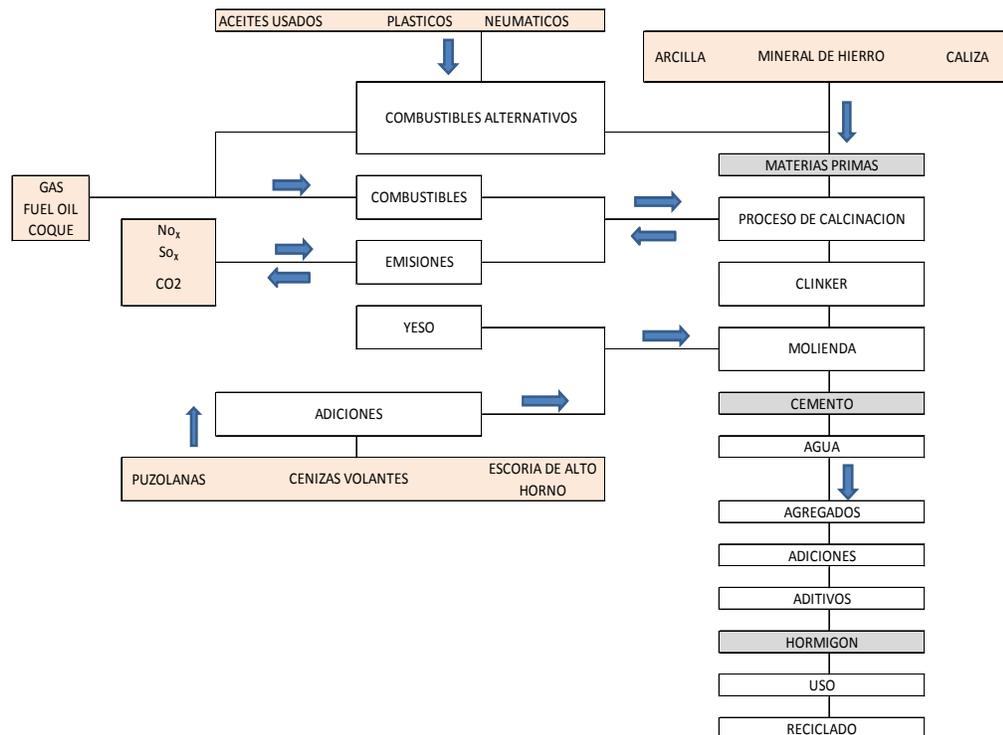
- Adquisición de materias primas
- Producción
- Construcción
- Uso: operaciones y mantenimiento
- Reciclado

El reusó busca alcanzar objetivos tales como la sustitución de los combustibles y las materias primas tradicionales por residuos adecuados en el proceso industrial. El reusó de residuos en la industria cementera facilita la posibilidad de alcanzar un máximo de sustitución de materiales no renovables. Los tipos de residuos que

pueden usarse en una planta cementera varían en función de cada instalación. Véase (Figura 2). Según las características del proceso de producción, la industria cementera puede reusar:

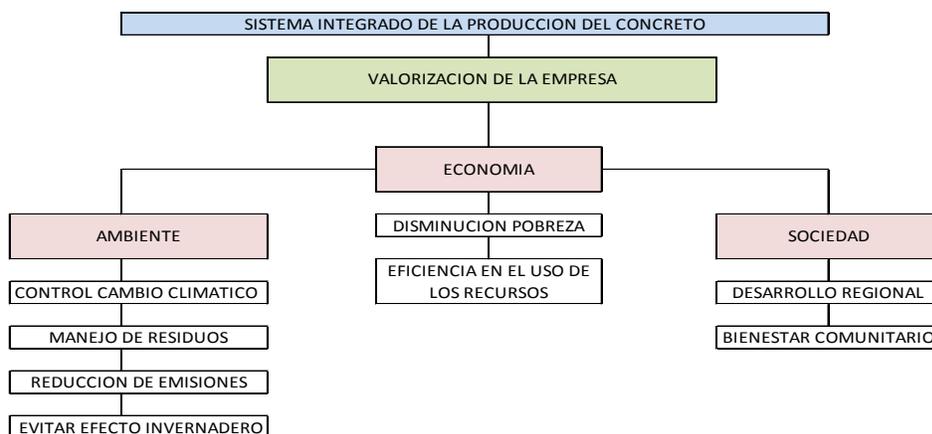
- Combustibles alternativos que tengan un importante poder calorífico (por ejemplo: aceites usados).
- Materias primas alternativas que contengan componentes minerales adecuados para la producción de clínker o cemento (por ejemplo: suelos contaminados).
- Materiales que aporten poder calorífico y proporcionen, al mismo tiempo, componentes minerales (por ejemplo: lodos de la industria papelera y neumáticos usados).

**Figura 2. A partir de materias primas alternas, hasta el reusó**



Con la sostenibilidad, durabilidad y reusó, es posible generar un sistema integrado de producción que le competa los impactos ambientales, la eficiencia del uso de los recursos y el bienestar común. Véase (Figura 3)

**Figura 3. Sistema integrado de la producción del concreto**



#### 4.4 Sitios Sostenibles

Una construcción hecha en concreto de alto desempeño será un sitio sostenible cuando:

- Todo el proceso, tanto la obtención de materias primas como el propio proceso constructivo, se desarrolle bajo un sistema de gestión medioambiental certificado.
- Se utilicen cementos con adiciones.
- Se utilicen cementos obtenidos por procesos que incorporen materias primas que produzcan menos emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Se recuperen zonas de cantera, después de realizar en ellas las correspondientes actividades de tipo extractivo
- Se utilice para la fabricación del concreto, agua reciclada
- Se optimice la calidad del concreto y se reduzca la cuantía de las armaduras.
- Se reduzca el consumo de materiales de modo compatible con el cumplimiento de las exigencias de durabilidad que permita alargar la vida útil de las construcciones.

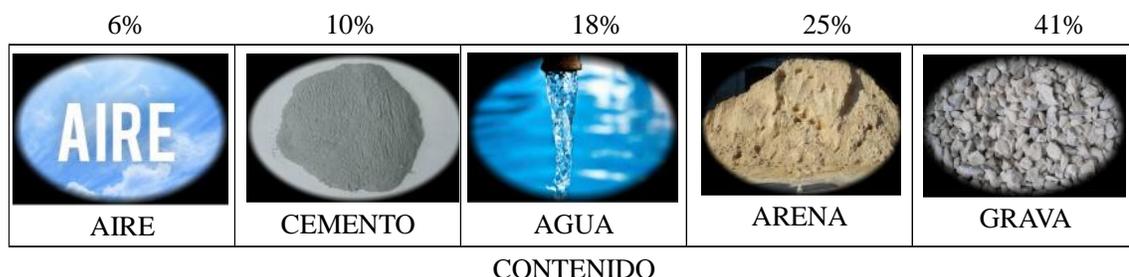
#### 4.5 Eficiencia y Manejo del Recurso del Agua

Para la sostenibilidad en los concretos de alto desempeño es necesario buscar la eficiencia en el manejo de agua por medio de:

- Aparatos conservadores de agua
- Considerar fuentes de agua alternativa, agua de lluvia, agua de escorrentía
- Eliminar el uso de agua potable
- Uso de agua lluvia recogida
- Uso de aguas residuales recicladas

En los concretos de alto desempeño se requieren tecnologías con el objetivo de elaborar productos de mejor calidad utilizando menos agua en su fabricación. Véase (Figura 4).

**Figura 4. Contenido del agua en la producción del concreto**



#### 4.6 Sistemas de Clasificación Leed

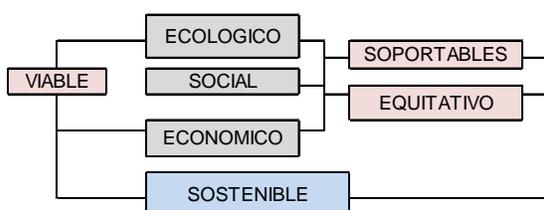
Con el propósito de promover practicas saludables, duraderas, económicas y solidas ambientalmente en el diseño y construcción de edificios, se generan unos requisitos para una acreditación LEED y se enfocan en los siguientes puntos:

- Eficiencia en el Agua
- Energía y atmosfera
- Materiales y recursos

- Calidad medio ambiental
- Innovación en el diseño

Para que los proyectos sean sostenibles, según la certificación LEED, debe examinarse desde los parámetros ecológicos, sociales que sean auto sostenible y económicamente equitativo para todos. Véase (Figura 5)

**Figura 5. Factores que implican el sistema LEED**



Las exigencias del medio actualidad para pertenecer a los concretos sostenibles y estar en base al sistema de clasificación LEED, cobran gran importancia en el mundo para proyectos que están a favor de la preservación de los recursos y una producción más limpia. Los concretos deben ser autocompactables, flexibles, autolimpiables, resistentes y translucidos. Véase (Figura 6).

Figura 6. Los concretos sostenibles son autocompactables, permeables, alta resistencia, flexibles, autolimpiables y translucidos.



Fuente: Copyright Concreto. 2014, Tecnología del concreto. 360 Grados Blog en Concreto. <http://360gradosblog.com/index.php/category/tecnologia-del-concreto>.

---

## **5 CONTROL DE CALIDAD**

En los concretos de alto desempeño es una necesidad mantener controles de calidad a lo largo de su fabricación, cubriendo todos los aspectos relacionados a la caracterización de materiales, acopios, dosificaciones, amasados, transporte y colocación. En muchos casos es recomendable un manual de procedimientos de calidad, en el cual se definen las competencias y responsabilidades de las partes que intervienen en la producción de esta clase de concretos, respaldado por la verificación del plan de control.

### **5.1 Tipos de Control**

#### **5.1.1 Control de Materiales**

El control de los materiales permite obtener su caracterización física, mecánica y química, para asegurar la existencia de material idóneo, que permita un control de recepción, para disponerlo a producción.

##### **5.1.1.1 Cemento**

Para este material es importante exigir el certificado de garantía del fabricante. Se debe realizar al comienzo de la producción o al variar la fuente de suministro de este material, ensayos físicos que destaquen tiempos de fraguado, resistencias mecánicas a los 2 y 28 días y ensayos periódicos (cada 3 meses) de comprobación de características químicas.

##### **5.1.1.2 Grava**

En el caso de las gravas se debe exigir el certificado de características mineralógicas y petrográficas del material. Se debe realizar al comienzo de la producción o al variar la fuente de suministro de este material, características físico – químicas, como granulometrías, coeficientes de forma, contenido de finos, reactividad con los Álcalis, entre otros, y características físico - mecánicas, como resistencias al desgaste, absorción de agua y pérdida de peso frente a sulfatos.

### **5.1.1.3 Arenas**

Al igual que las gravas se debe exigir certificados de características mineralógicas y petrográficas del material. Se debe realizar al comienzo de la producción o al variar la fuente de suministro de este material, características físico- químicas, de granulometría, contenidos de materia orgánica, contenido de finos, reactividad con los álcalis, material retenido por el tamiz 0,063, y características físico – mecánicas, como absorción de agua, pérdida de peso frente a sulfatos, entre otros.

### **5.1.1.4 Agua**

Para este insumo como mínimo debemos conocer su procedencia, descartando aguas de mar o salinas. Se debe conocer su (pH), contenido de sulfatos, ion cloruro, sustancias orgánicas, entre otras.

### **5.1.1.5 Aditivos**

Se debe exigir el certificado de garantía del fabricante.

## **5.1.2 Control de Fabricación**

En este control se debe verificar la exactitud de las dosificaciones que deben estar definida en un manual de calidad. Se debe disponer de una lista de chequeo para verificar algunos aspectos, como por ejemplo, control de segregación y uniformidad durante el vertido, correcciones de humedad, control de adición de aditivos, temperatura del cemento y cualquier otro parámetro que sirva como indicador del proceso de producción. La lista de chequeo permitirá realizar ajustes previos en la dosificación, fabricación y amasado, definiendo ensayos característicos que comprueben que la dosificación teórica, con el empleo de los medios disponibles, responden a las características exigidas.

### 5.1.3 Control de Recepción

En un control de recepción en obra se deben desarrollar criterios para determinar muestras representativas, a las cuales se les realiza ensayos para determinar su idoneidad. Estos criterios permitirán determinar lotes de control y el volumen de concreto requerido para los ensayos. Los criterios se basan según el tipo de elementos estructurales (elementos a compresión, flexión y macizos), que permitan desarrollar ensayos estadísticos como resistencias medias y estimadas, con probabilidades de obtener valores de ensayo inferior a la especificada en obra.

A manera general en un control de recepción se debe revisar:

- Peso unitario
- Relación agua material cementante
- Volumen de aire ocluido
- Porcentaje de adiciones incorporadas
- Temperatura ambiente
- Temperatura del hormigón
- Dosificación empleada
- Módulo de elasticidad

### 5.1.4 Control de Instalaciones

En el proceso de suministrar los concretos de alto desempeño, tiene importancia primordial la consistencia a pie de bomba o encofrado. Los ensayos característicos de este tipo de concreto deben realizar los siguientes procedimientos:

- Determinar la consistencia finalizado el proceso de amasado.
- Determinar el límite de utilización del concreto (tiempo de transporte e instalación)
- Velocidad de rotación, duración del amasado, duración del transporte, revoluciones de amasado, revoluciones durante el transporte.
- Homogenización del material

- Medida de la consistencia final y fabricación de probetas para ensayo.

### **5.1.5 Control de Ejecución.**

En la construcción de los elementos estructurales se requiere para garantizar el alto desempeño, procesos de:

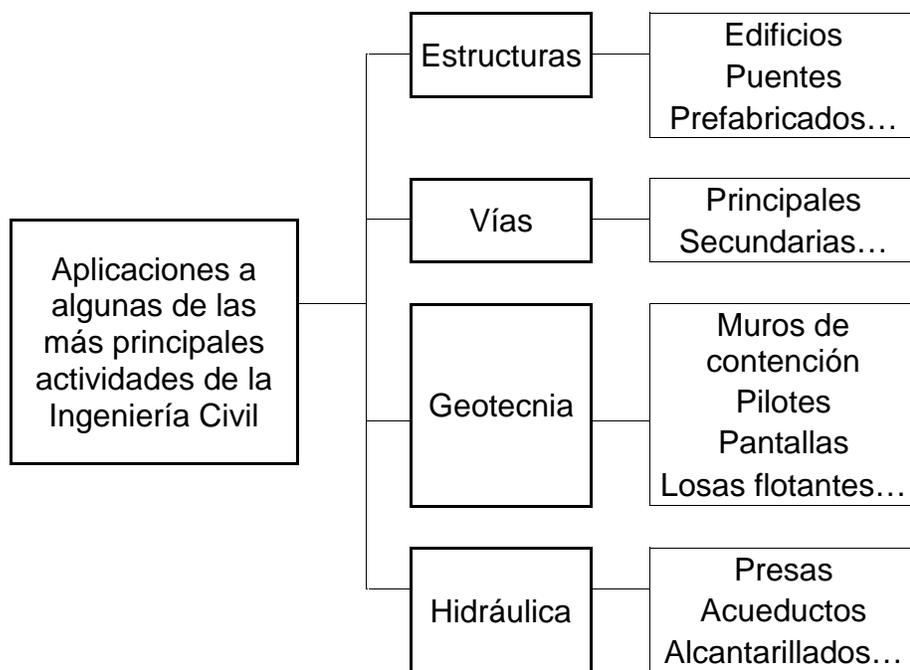
- Compactación y curado.
- Desencofrado en el cual se debe determinar la edad del concreto y observaciones de los aspectos de las caras y rotura de las aristas.
- Descimbrado en el cual se debe determinar la edad del concreto y observaciones del sistema de descimbrado.
- Determinación de tolerancias dimensionales, como longitud canto, contra flechas y algunas otras observaciones que se consideren pertinentes.

## **6 APLICACIONES**

Los concretos de alto desempeño tienen amplios campos de aplicación en todas las ramas de la ingeniería y en cada una de ellas se extiende a una diversidad de proyectos con propósitos establecidos que requieren de las cualidades de este tipo de concretos.

En la Figura 7 se observa las ramas de la ingeniería con algunas de las actividades en las cuales tienen competencia y se justifica la presencia o la necesidad de implementar concretos de alto desempeño.

**Figura 7. Actividades de la Ingeniería Civil**



### 6.1 Aplicaciones en la ingeniería Vial

Los sistemas masivos de transporte, las cargas y la diversidad de tipos de suelo afectan los elementos estructurales de vías que hacen parte de arterias principales, secundarias y hasta terciarias. Se requiere altas características mecánicas y de durabilidad que permitan evitar el deterioro por desgaste o abrasión específicamente. Los concretos de alto desempeño permiten desarrollar vías con losas de alta resistencia mecánica, resistencia a la abrasión y fuerzas de impacto.

### 6.2 Aplicaciones en la ingeniería Geotécnica

Al tratarse de estructuras en contacto directo con el suelo y sustancias reactivas al concreto, se requiere prevenir afectaciones con el uso de mejores concretos que el convencional de 21MPa. Los concretos son atacados directamente por agentes agresivos que reducirán ostensiblemente su periodo de vida y propósito. La escorrentía, las sustancias químicas, la vegetación, el nivel freático, la temperatura, son parámetros que obviamente requieren de concretos de altísimo

---

desempeño y durabilidad. Entre las estructuras que podemos promover el alto desempeño y durabilidad encontramos lo pilotes, cajones, muros de contención, tuberías, entre otros.

### **6.3 Aplicaciones en la ingeniería Hidráulica**

En la rama hidráulica, las estructuras de concreto son impactadas por el estado de la materia líquido, el cual transporta una cantidad de sustancias que pueden reaccionar con los componentes del concreto, como es el caso de aguas salinas o con contenido de cloruros. Estos líquidos a su vez pueden transportar químicos los cuales reaccionan con el concreto y aceleran su deterioro. La evaluación y estimación del uso de mejores tipos de concreto debe estar orientada a discriminar las zonas urbanas de las rurales y de las de manipulación química y salina. Las aplicaciones más usuales son en acueductos alcantarillados y presas eléctricas. Que por su costo y uso vital se requiere que sean durables.

### **6.4 Aplicaciones en la ingeniería estructural**

#### **6.4.1 En edificaciones**

En el caso de las estructuras, la construcción de edificaciones cada vez más imponentes y arriesgadas, han propiciado a desarrollar el alto desempeño en los concretos y por su alto impacto ambiental se ha requerido que su desarrollo este de la mano con la sostenibilidad.

El concreto de alto desempeño al no ser un tema nuevo, el mundo ha desarrollado esta tecnología y exige constantemente que se continúen las investigaciones que permitan mejorar el producto actual. El desarrollo de las nuevas edificaciones va dirigida a satisfacer unas necesidades específicas las cuales son:

- Máximo aprovechamiento del suelo. La población mundial va en crecimiento exponencial y de igual manera la exigencia de vivienda y campo laboral, implican aprovechar al máximo el suelo y extenderse verticalmente a estructuras tipo rascacielos que fomenten la optimización de espacios.
- Atracción turística y confianza financiera. El confort de instalaciones, la atracción turística y la competencia mundial por demostrar vanguardia ante la tecnología y desarrollo para generar confianza a la inversión extranjera
- Mayor rigidez.
- Menor costo del material.

- Mayor conservación, sobre todo en estructuras expuestas a la acción del medio ambiente.
- Secciones reducidas, proporcionando mayor superficie útil.
- Posee mayor durabilidad y en consecuencia incrementa la vida útil de la estructura.
- Mayor manejabilidad que permite una colocación y compactación más fácil.
- Disminuir el peso propio de las estructura, con la reducción de las dimensiones de la cimentación.
- Permitir mayor esbeltez en las secciones.
- Reducir el tiempo de encofrado, por ende el plazo de ejecución de las obras.

En la Tabla 8, encontramos un listado de las edificaciones más imponentes del mundo, desarrolladas hasta el año actual, fácilmente se observa que superan los 400 metros de altura, con una cantidad de aproximadamente 90 pisos, donde la mayoría de ellos tienen un uso de carácter residencial y de oficinas.

**Tabla 8. Edificaciones más imponentes en el mundo**

	NOMBRE	CIUDAD	ALTURA (m)	PISOS	AÑO	USO
1	Trump International Hotel & Tower	Chicago (US)	423	98	2009	residencial/ hotel
2	Al Hamra Tower	Kuwait City (KW)	413	80	2011	oficinas
3	23 Marina	Dubai (AE)	393	90	2012	residencial
4	CITIC Plaza	Guangzhou (CN)	390	80	1996	oficinas
5	World Trade Center Abu Dhabi - The Residences	Abu Dhabi (AE)	381	88	2014	residencial
6	Elite Residence	Dubai (AE)	380	87	2012	residencial
7	Central Plaza	Hong Kong (CN)	374	78	1992	oficinas
8	Almas Tower	Dubai (AE)	360	68	2008	oficinas
9	The Pinnacle	Guangzhou (CN)	360	60	2012	oficinas
10	JW Marriott Marquis Hotel Dubai Tower 1	Dubai (AE)	355	82	2012	hotel
11	JW Marriott Marquis Hotel Dubai Tower 2	Dubai (AE)	355	82	2013	hotel
12	Mercury City Tower	Moscow (RU)	339	75	2013	residencial/ oficinas
13	The Torch	Dubai (AE)	337	79	2011	residencial
14	Keangnam Hanoi Landmark Tower	Hanoi (VN)	336	72	2012	hotel / residencial / oficinas
15	Shimao International Plaza	Shanghai (CN)	333	60	2006	hotel / oficinas

**Fuentes (the Skyscraper Center, 2014)**

A continuación algunas de las edificaciones más imponentes del mundo, con referencia a la Tabla 8.

### Fotografía 3. Trump International Hotel & Tower



El Trump International Hotel and Tower, también conocida como la Torre Trump de Chicago, es un hotel rascacielos en el centro de Chicago, Illinois. Completado en 2009, tiene una altura de 1,134 pies (345.6 m), (1.362 pies (423 m), incluyendo la aguja). Diseñado por Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM) de 98 pisos, se construyó con una serie de mezclas de concreto de alto rendimiento diseñados por Prairie Material de Sales, Inc.

**Fuentes: (Baker W. K., 2008, the Skyscraper Center, 2014)**

### Fotografía 4. Al Hamra Tower



Al Hamra Tower es un rascacielos situado en Kuwait. Diseñada por la firma arquitectónica Skidmore, Owings and Merrill, la torre es el edificio más alto de Kuwait. Su construcción finalizó en 2011 con 413 m (1354 pies), con 80 pisos. Será la torre esculpida más alta del mundo.

La torre incluye 195 000 m<sup>2</sup> (2 099 000 pies<sup>2</sup>) de espacio comercial y de oficinas. La torre fue construida en una parcela de 18 000 m<sup>2</sup> (194 000 pies<sup>2</sup>).

**Fuentes: (Sarkisian, 2008, the Skyscraper Center, 2014)**

**Fotografía 5. 23 Marina**

23 Marina es un rascacielos residencial ubicado en Dubái, siendo su promotora Hiranandani Group de Bombai, India. La torre tiene 90 pisos y se eleva hasta los 393 m. La torre tiene 57 piscinas, y cada dúplex vendrá equipado con su propio ascensor privado. El hall de entrada del edificio mide seis plantas de altura. Fue terminada en el 2012.

**Fuentes: (Wikipedia, 2014, the Skyscraper Center, 2014)**

**Fotografía 6. World Trade Center Abu Dhabi**

El World Trade Center Abu Dhabi - The Residences es un rascacielos de Abu Dhabi, que mide 381 m y tiene 88 plantas. Se localiza en el Central Market. Forma parte del World Trade Center, que es un complejo de 3 torres, una de ellas es esta. La finalización estuvo programada a finales de 2013 y la de todo el proyecto en 2014.

**Fuentes: (Wikipedia W. T., 2014, the Skyscraper Center, 2014)**

**Fotografía 7. Elite Residence**

Residence Elite es un rascacielos en Dubái, Emiratos Árabes Unidos, en el distrito de Dubái Marina, con vistas a una de las palmeras artificiales. El edificio mide 380 m (1.247 pies) de altura y tiene 87 pisos. De las 87 plantas 76 son de apartamentos (697) y las otras 15 incluyen servicios como piscinas, spas, áreas de recepción, centros de salud, un centro de negocios y un gimnasio. Su construcción finalizó en 2012.

**Fuentes: (Wikipedia E. R., 2014, the Skyscraper Center, 2014)**

**Fotografía 8. JW Marriot Marquis Hotel Dubai Tower 2**

El JW Marriott Marquis Hotel Dubai Towers es un complejo de torres gemelas que está en Dubái, Emiratos Árabes Unidos. Fue concebido originalmente como una sola torre, a 355 metros de altura, con 82 pisos, debía ser completado en 2012 y construido junto al Sheik Zayed Road.

**Fuentes: (Wikipedia J. M., 2014, the Skyscraper Center, 2014)**

### Fotografía 9. Mercury City Tower



Fuentes: (Wikipedia M. C., 2014, the Skyscraper Center, 2014)

### 6.4.2 Edificaciones que se desarrollaran en los próximos años en el mundo

En la Tabla 9 encontramos edificaciones que se desarrollaran en los próximos años en el mundo, estructuras bellas e intrépidas. La propuesta más arriesgada se encuentra en Kingdom Tower con una altura de 1000 m, más de 160 pisos con uso residencial y de oficinas. Las otras estructuras descritas mantienen una tendencia de conservar las alturas y cantidad de pisos que en la actualidad se poseen.

**Tabla 9. Edificaciones futuras del mundo**

	NOMBRE	CIUDAD	ALUTURA (m)	PISOS	AÑO	USO
1	Kingdom Tower	Jeddah (SA)	1000	167	2019	residencial / oficinas
2	106 Tower	Dubai (AE)	433	107	2018	residencial
3	Marina 101	Dubai (AE)	427	101	2015	hotel
4	432 Park Avenue	New York City (US)	426	85	2015	residencial
5	225 West 57th Street	New York City (US)	425	88	2018	residencial
6	Oberoi Oasis Tower B	Mumbai (IN)	386	85	2016	residencial
7	Federation Towers - Vostok Tower	Moscow (RU)	373	95	2015	residencial / oficinas
8	The Address The BLVD	Dubai (AE)	370	72	2016	residencial / hotel

Fuentes (the Skyscraper Center, 2014)

Acontinuacion vease las edificaciones que se pretenden edificar en los proximos años, con referencia a la Tabla 9.

#### Fotografía 10. Kingdom Tower

	<p>La Kingdom Tower es un rascacielos, construcción que será terminada durante el año 2019. El proyecto fue anunciado el 2 de agosto del año 2011 y está dirigido por el arquitecto estadounidense Adrian Smith. Este estará ubicado en Arabia Saudita, en la ciudad de Yida, y tendrá el record del edificio más alto del planeta, midiendo aproximadamente 1000 metros de altura.</p>
---	---

Fuentes: (Wikipedia K. T., 2014, the Skyscraper Center, 2014)

#### Fotografía 11. West 57th Street

	<p>225 West 57th Street, es un proyecto residencial, está siendo desarrollado por la Compañía de Desarrollo Extell en Midtown Manhattan, Ciudad de Nueva York. El edificio se elevará 425 m a su techo, y 541 m a su torre. Convirtiéndose así en el segundo edificio más alto de la ciudad y el país. El proyecto terminara en 2018.</p>
---	---

Fuentes: (Wikipedia 2. W., 2014, the Skyscraper Center, 2014)

**Fotografía 12. Marina**

	<p>La Dream Dubái Marina es un rascacielos de 427 metros y 101 plantas, actualmente en construcción. Este edificio se sitúa en la Dubái Marina, Emiratos Árabes Unidos (EAU). El rascacielos tendrá 300 habitaciones de hotel y 420 apartamentos con servicio. Cuando finalice su construcción, será el segundo rascacielos más alto de Dubái y de los EAU. El proyecto finalizara en el 2015 con funcion de hotel.</p>
---	---

**Fuentes: (Wikipedia D. D., 2014, the Skyscraper Center, 2014)**

**Fotografía 13. Park Avenue**

	<p>432 Park Avenue es un rascacielos residencial promovido por CIM Group para Midtown Manhattan, Nueva York, Estados Unidos. Con una altura de 426 m (1398 pies) y 147 apartamentos, se convertirá en uno de los edificios más altos de Estados Unidos. El proyecto finalizara en el 2015.</p>
--	--

**Fuentes: (Wikipedia 4. P., 2014, the Skyscraper Center, 2014)**

#### Fotografía 14. Oberoi Oasis Tower B



Oasis Tower es un rascacielos en construcción en Mumbai, Maharashtra, India. Será 385 metros (1.220 pies) y 85 pisos, albergará un hotel, oficinas y locales comerciales. Ha sido diseñado por Kohn Pedersen Fox , EE.UU.. El proyecto culminara en 2016

**Fuentes: (Wikipedia O. T., 2014, the Skyscraper Center, 2014)**

#### 6.4.3 Edificaciones en Colombia

La Tabla 10 se describe algunas de las edificaciones mas importantes en Colombia. Se pretende en el proximo año lograr una edificación de aproximadamente 260 m de altura, con 67 pisos, tipo de uso hotelero. De igual manera se observa que gran parte de las nuevas edificaciones estan en el sector turistico de Cartagena y otras cuantas en la capital del pais.

**Tabla 10. Edificaciones más importantes en Colombia**

	NOMBRE	CIUDAD	ALTURA (m)	PISOS	AÑO	USO
1	BD Bacata Torre 1	Bogota (CO)	260	67	2016	hotel
2	BD Bacata Torre 2	Bogota (CO)	200	50	2016	-
3	Torre Colpatria	Bogota (CO)	192	50	1979	oficinas
4	Centro de Comercio Internacional	Bogota (CO)	190	50	1974	oficinas
5	Torre de Cali	Cali (CO)	183	44	1980	hotel
6	Edificio Coltejer	Medellin (CO)	175	37	1972	oficinas
5	Torre de Cali	Cali (CO)	183	44	1980	hotel
8	Grand Bay Club	Cartagena (CO)	170	46	2011	residencial
9	Edificio Avianca	Bogota (CO)	161	41	1969	oficinas
10	Torre del Cafe	Medellin (CO)	160	36	1975	oficinas
11	Contraloria General de la Nacion	Bogota (CO)	145	36	1974	oficinas
12	Edificio Horizontes	Cartagena (CO)	140	37	2007	residencial
12	Edificio Colseguros	Bogota (CO)	140	36	1971	oficinas
14	Edificio Camara de Comercio	Medellin (CO)	139	32	1974	oficinas
15	North Point 3	Bogota (CO)	125	34	2009	oficinas
15	Palmetto	Cartagena (CO)	125	34	2009	residencial
17	Ciudadela San Martín Torre Sur	Bogota (CO)	123	38	1970	hotel
18	Edificio Seguros Tequendama	Bogota (CO)	122	38	1970	oficinas
19	Palmetto Eliptic	Cartagena (CO)	-	42	2011	residencial
19	Ocean Tower	Cartagena (CO)	-	37	2014	residencial / hotel

**Fuentes (the Skyscraper Center, 2014)**

Acontinuacion vease algunas de las edificaciones mas importantes de colombia con referencia a la Tabla 10.

**Fotografía 15. Ocean Tower Cartagena**

El proyecto de vivienda OCEAN TOWER se encuentra ubicado en la ciudad de Cartagena de Indias, en el sector de Bocagrande.

**País:** Colombia

**Función:** Residencial / hotel

**Material estructural:** Concreto

**Inicio de la Construcción:** 2012

**Finalización:** 2014

**Pisos:**37

**Fuentes (the Skyscraper Center, 2014)**

**Fotografía 16. Palmetto Eliptic**

La edificación se encuentra ubicado en Bocagrande, Frente a la Playa y al Mar Caribe, su nombre Oficial es Palmetto Eliptic.

**Tipo:** Edificio

**Estado:** Completado

**País:** Colombia

**Ciudad:** Cartagena

**Función:** Residencial

**Material estructural:** Concreto

**Inicio de la Construcción:** 2009

**Finalización:** 2011

**Pisos:** 42

**Fuente(the Skyscraper Center, 2014)**

**Fotografía 17. Grand Bay Club**

Nombre Oficial Gran Bay Club

**Estado:** Completado

**País:** Colombia

**Ciudad:** Cartagena

**Función:** Residencial

**Material:** Concreto

**Inicio de la Construcción:** 2008

**Finalización:** 2011

**Altura:** 170 metros.

**Pisos:** 46

**Fuentes (the Skyscraper Center, 2014)**

**Fotografía 18. North Point 3 Bogotá**

Nombre Oficial North Point 3

**Tipo:** Edificio

**Estado:** Completado

**País:** Colombia

**Ciudad:** Bogotá

**Función:** Oficina

**Material:** Concreto

**Inicio de la Construcción:** 2007

**Finalización:** 2009

**Altura:** 125 metros.

---

## Fuentes (the Skyscraper Center, 2014)

### 6.4.4 Puentes

Los puentes cada vez demandan mayor tecnología para su desarrollo, con mayores luces, con directo contacto a agentes agresivos en su infraestructura y superestructura. La mayor parte de puentes imponentes en la actualidad libran condiciones meteorológicas adversas, como corrientes de aire, huracanes, tempestades, entre otros.

En el presente documento se ha destacado los más llamativos puentes del mundo que invitan al esplendor de un material de alto desempeño, durable en el tiempo y sostenible ambientalmente.

#### Fotografía 19. Puente Great Belt



El puente Great Belt es el tercer puente más largo del mundo. Con una longitud colgante principal de 1624 metros entre sus dos torres principales. El puente fue puesto en servicio en 1998 y une a las islas danesas de Zealand y Funen. El puente tiene una longitud total de 6790 metros y una altura máxima de 254 metros. La parte colgante se encuentra a unos 65 metros sobre el agua para dar paso a las naves que lo cruzan por debajo.

Fuentes: (Infrared Camera, 2014)

**Fotografía 20. Puente Sunshine Skyway**

El Puente Sunshine Skyway es un puente que cruza Tampa Bay, Florida. Tiene un atirantado vano principal con una longitud de aproximadamente 8.85 kilómetros. Con la aplicación de concretos de alto desempeño se realizan mantenimientos para evitar la corrosión del acero en los prefabricados de columnas segmentarias. Se ha requerido entrar en la superestructura del puente para reforzar sus secciones.

**Fuentes: (Mega construcciones, 2013)**

**Fotografía 21. Puente Erasmusbrug**

El puente Erasmusbrug esta localizado en Holanda, el pilón asimétrico con forma de horquilla o de "cisne" define el carácter innovador. El pilón sostiene 32 tirantes, tiene aproximadamente 800 m de longitud y una altura de 139 m. Al poco tiempo de su apertura se descubrió que el puente era inestable por el viento y mediante un sistema de amortiguamiento anti-shock se logró neutralizar las vibraciones que producían las turbulencias eólicas.

**Fuentes: (Wikipedia E. , 2014,Taringa puentes mas famosos, 2012)**

### Fotografía 22. Puente Millau



Fuentes (Wikipedia. d., 2014, Taringa puentes mas famosos, 2012)

#### 6.4.5 Prefabricados

Los elementos prefabricados ofrecen un margen considerable de beneficio en la eficiencia estructural, al generar elementos como vigas y trabes más ligeros que prolongan la calidad de la construcción y finalmente se obtiene cualidades industriales, comerciales, al salvar claros más largos con cargas superiores a las 100 ton/m<sup>2</sup>.

En el contexto del medio ambiente, la industria de prefabricados de concreto está en la reducción de factores o agentes contaminantes: hasta un 45% en el uso de materiales tradicionales, hasta un 30% en el uso de energía eléctrica, un 40% menos residuos de demolición, entre otros factores. Las futuras plantas de prefabricación funcionarán como un sistema cerrado, en el que todo se procesará, reciclará e industrializará en nuevos elementos para la construcción

Los prefabricados avanzan en cuestiones de seguridad, resistencia al fuego sin la necesidad de alguna protección. Mejorar la velocidad de construcción don se puede duplicar la velocidad de instalación de elementos en comparación con el acero. Mejor aislamiento acústico y disminuir la deformación estructural en elementos horizontales como losas.

Las limitantes de su producción está en función de varios factores como: el tamaño de las plantas, la sección transversal admisible de las columnas

principales, el tipo de fachada, la capacidad de carga de las torre grúas, mano de obra calificada, entre otras.

El futuro de los prefabricados está enfocada en la investigación de las conexiones que son parte esencial del proceso constructivo y su función consiste en fusionar los elementos individuales y convertirlos en una estructura coherente y sólida capaz de soportar todas las fuerzas que actúan de forma directa e indirecta.

A continuación se presenta algunas de las aplicaciones de los concretos de alto desempeño en prefabricados.

### **Fotografía 23. Vigas prefabricadas**



Están diseñadas y fabricadas en diferentes geometrías, cantos y longitudes. solucionan diferentes condiciones de carga, luces, etc.

**Fuentes (Arquitectura R. D., 2014, Titan Edificaciones, 2014)**

### **Fotografía 24. Muros de contención prefabricados**



Están diseñadas para casi cualquier condición de impacto, cumplen con estándares nacionales e internacionales de disipación de energía. La variedad de diseños, tanto geométricos como estructurales, permite modular barreras en zonas rectas y curvas y con velocidades de diseño diferentes.

**Fuentes (Titan Edificaciones, 2014)**

### Fotografía 25. Placas Alveolares prefabricadas



Losas en concreto prefabricado con espesor pequeño que se aplican en sistemas de entrepiso de acuerdo a especificaciones de proyecto. Se fabrican a la medida en donde se requiere este tipo de losa. Son fáciles de transportar, maniobrar, permiten mantener orden y limpieza en obra sin la necesidad de colar en sitio y usar cimbras, lo cual genera ahorros en cuestión de tiempos de ejecución, entre otros.

Fuentes (Titan Edificaciones, 2014)

### Fotografía 26. Acueductos y Alcantarillados



Son elementos de concreto sin refuerzo para diámetros inferiores a 100 cm que permiten realizar cambios de alineación en las redes de alcantarillado y ejecutar conexiones de tubería, según las necesidades de cada proyecto.

Fuentes (Titan Edificaciones, 2014)

## 7 CARACTERIZACIÓN AL ALTO DESEMPEÑO

### 7.1 Propiedades Mecánicas

Entre los parámetros más comúnmente utilizados en la caracterización de concretos de alta resistencia y desempeño encontramos la resistencia a

---

compresión y el módulo de elasticidad, que permiten profundizar y analizar el comportamiento del material.

La mezcla convencional del mercado nacional que en este documento se denominara mezcla patrón (21 MPa), se compara con otras mezclas de mayor resistencia, identificando la variación de ventajas que favorecen su desempeño.

### **7.1.1 Resistencia a Compresión**

La resistencia es una guía para caracterizar los concretos y una manera de relacionarla con el desempeño y la durabilidad. Al establecer una resistencia esta debe estar condicionada al tipo de producción de concreto, laboratorio u obra, los cuales dependen de los distintos procedimientos de vertido, compactación y curados aplicados.

Para determinar completamente la resistencia es necesario investigar una serie de características inherentes a esta cualidad; entre las más evidentes se encuentran la edad del material, en el momento del ensayo, la clase de curado al que ha estado sometido (estado de saturación), tamaño y forma de las probetas y por ultimo las condiciones de ensayo (cargas permanentes o instantáneas).

El montaje desarrollado en laboratorio para la obtención de la resistencia a compresión de las mezclas de 21, 42,49 y 56 MPa, se observa en la Fotografía 27.

### Fotografía 27. Montaje para resistencia a compresión



En la Tabla 11 se describe la programación para la obtención de la resistencia a diferentes edades de las mezclas planteadas.

**Tabla 11. Esquema general modelo de análisis**

Mezcla		Cantidad de muestras (Probeta 4X8")			
		Edad (días)			
PSI	MPa	3	7	28	56
3000	21	2	2	2	2
6000	42	2	2	2	2
7000	49	2	2	2	2
8000	56	2	2	2	2

A continuación se presentan los datos de resistencia determinados en laboratorio, con la edad del material 3, 7, 28 y 56 días para todas las mezclas. La resistencia promedio alcanzada se compara con la resistencia esperada.

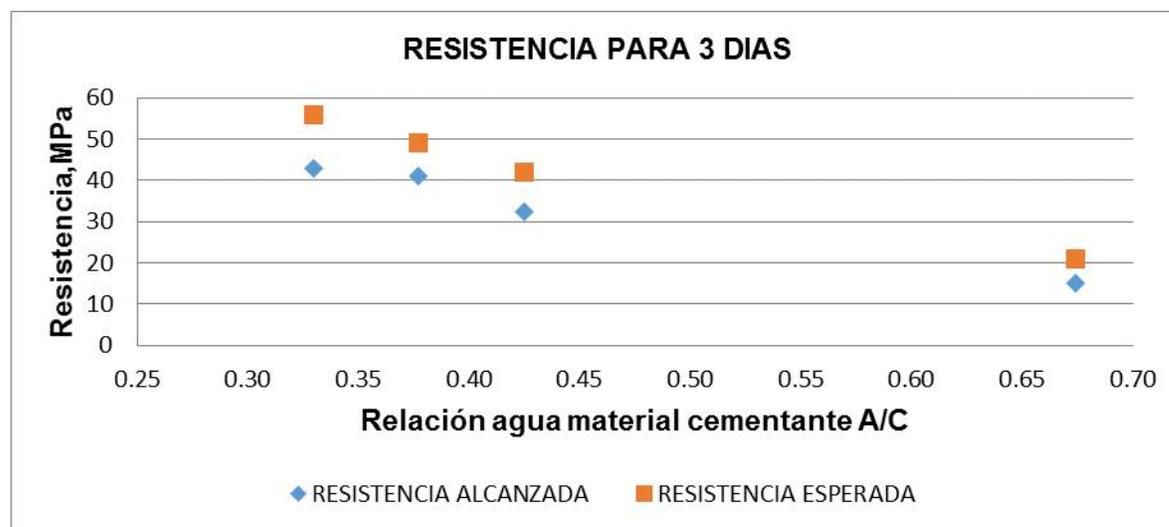
**Tabla 12. Resistencia a los 3 días**

Mezcla	Resistencia (PSI) (MPa)					
	Edad 3 (días)					
	PSI	MPa	Probeta 1	Probeta 2	Promedio (PSI)	Promedio (MPa)
3000	21	14.42	15.94	2169	15.18	72%
6000	42	31.54	33.26	4629	32.40	77%
7000	49	40.98	41.38	5883	41.18	84%
8000	56	42.85	43.18	6145	43.02	77%

*Análisis de resultados: Tabla 12*

Se toman dos probetas a la edad de 3 días, por cada tipo de mezcla, 3000, 6000, 7000 y 8000 PSI, las cuales alcanzan una resistencia promedio del orden del 72%,77%,84%,77%, respectivamente. Las cuatro mezclas mantienen una tendencia satisfactoria para llegar a la resistencia nominal requerida o en el mejor de los casos superarla.

**Figura 8. Grafica de alcance de resistencia a los 3 días**



*Análisis de resultados: Figura 8*

De la gráfica de resistencia a la edad de 3 días se observa las diferentes relaciones agua/material cementante, que constituyen a las cuatro tipo de mezclas, Véase (Tabla 1), las cuales alcanzan una resistencia, igual o superior, al

72% de la resistencia esperada. La diferencia de agua/material cementante no refleja, a simple vista, incidir en que una mezcla u otra puedan alcanzar rápidamente la resistencia esperada.

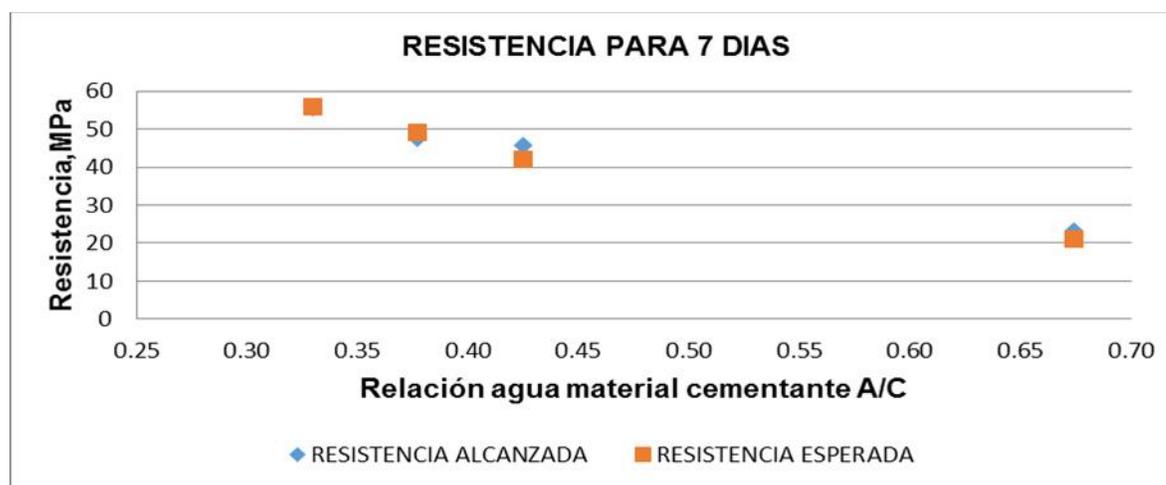
**Tabla 13. Resistencia a los 7 días**

Mezcla	Resistencia (PSI) (MPa)					
	Edad 7 (días)					
PSI	MPa	Probeta 1	Probeta 2	Promedio (PSI)	Promedio (MPa)	%
3000	21	23.94	22.24	3299	23,09	110%
6000	42	45.59	45.64	6516	45.62	109%
7000	49	50.77	44.43	6800	47.60	97%
8000	56	54.10	56.82	7923	55.46	99%

*Análisis de resultados: Tabla 13*

Se toman dos probetas a la edad de 7 días, por cada tipo de mezcla, 3000, 6000, 7000 y 8000 PSI, las cuales alcanzan una resistencia promedio del orden del 110%,109%,97%,99%, respectivamente. Dos de las mezclas de 3000 y 6000 PSI, a la edad de 7 días han superado la resistencia nominal; las mezclas restantes se encuentran próximas a obtener la resistencia, por lo que los resultados de manera general son satisfactorios.

**Figura 9. Grafica de alcance de resistencia a los 7 días**



*Análisis de resultados: Figura 9*

De la gráfica de resistencia a la edad de 7 días se observa las diferentes relaciones agua/material cementante, que constituyen a las cuatro tipo de mezclas, Véase (Tabla 1), las cuales alcanzan una resistencia, igual o superior, al 97% de la resistencia esperada. Las mezclas con mayor relaciones agua/material cementante se ven superan la resistencia esperada, mientras que las de menor relación todavía no alcanzan el 100%.

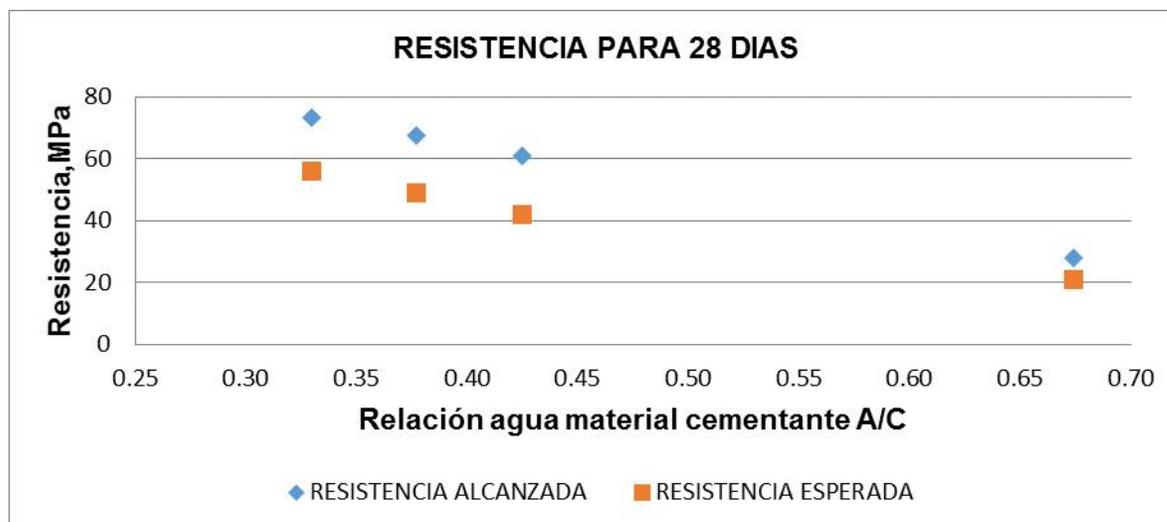
**Tabla 14. Resistencia a los 28 días**

Mezcla	Resistencia (PSI) (MPa)					
	Edad 28 (días)					
	PSI	MPa	Probeta 1	Probeta 2	Promedio (PSI)	Promedio (MPa)
3000	21	27.09	28.66	3982	27.87	133%
6000	42	60.27	61.70	8712	60.99	145%
7000	49	66.75	68.47	9658	67.61	138%
8000	56	73.30	73.14	10460	73.22	131%

*Análisis de resultados: Tabla 14*

Se toman dos probetas a la edad de 28 días, por cada tipo de mezcla, 3000, 6000, 7000 y 8000 PSI, las cuales alcanzan una resistencia promedio del orden del 133%,145%,138%,131%, respectivamente. Todas las mezclas superan la resistencia nominal, por lo que los resultados de manera general son satisfactorios.

**Figura 10. Grafica de alcance de resistencia a los 28 días**



*Análisis de resultados: Figura 10*

De la gráfica de resistencia a la edad de 28 días se observa las diferentes relaciones agua/material cementante, que constituyen a las cuatro tipo de mezclas, Véase (Tabla 1), las cuales alcanzan una resistencia, igual o superior, al 131% de la resistencia esperada. Las mezclas con menor relaciones agua/material cementante superan en mayor rango la resistencia esperada.

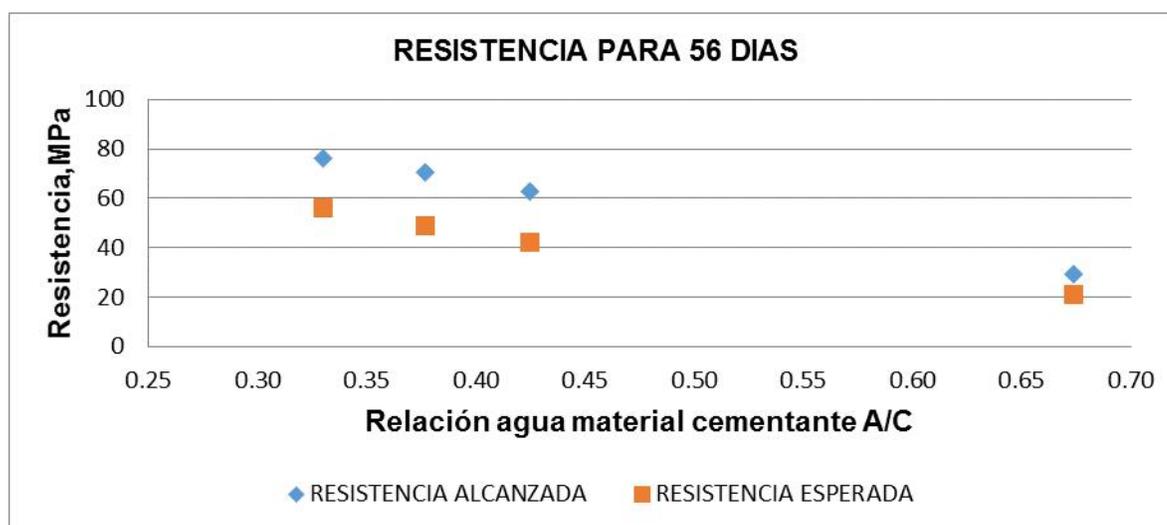
**Tabla 15. Resistencia a los 56 días**

Mezcla	Resistencia (PSI) (MPa)						
	Edad 56 (días)						
	PSI	MPa	Probeta 1	Probeta 2	Promedio (PSI)	Promedio (MPa)	%
3000	21	28.30	30.04		4167	29.17	139%
6000	42	61.84	63.74		8970	62.79	149%
7000	49	69.41	71.07		10035	70.24	143%
8000	56	76.74	75.99		10909	76.37	136%

### Análisis de resultados Tabla 15

Se toman dos probetas a la edad de 56 días, por cada tipo de mezcla, 3000, 6000, 7000 y 8000 PSI, las cuales alcanzan una resistencia promedio del orden del 139%,149%,143%,136%, respectivamente. Todas las mezclas incrementan su resistencia del orden del 4 al 5%, con respecto a las probetas de edad de 28 días. Con las resistencias establecidas se procede al campo de caracterización del desempeño, manteniendo condiciones de curado, hasta el proceso específico a realizar en cada probeta.

**Figura 11. Grafica de alcance de resistencia a los 56 días**



### Análisis de resultados: Figura 11

De la gráfica de resistencia a la edad de 56 días se observa las diferentes relaciones agua/material cementante, que constituyen a las cuatro tipo de mezclas, Véase (Tabla 1), las cuales alcanzan una resistencia, igual o superior, al 136% de la resistencia esperada. Las mezclas con menor relaciones agua/material cementante superan en mayor rango la resistencia esperada.

Las resistencias alcanzada para todos los tipos de mezclan superan el 30% de la resistencias esperada, a continuación se procede a la obtención del módulo de elasticidad de estas mezclas y completar para este documento las propiedades mecánicas que se han considerado las más relevantes.

### 7.1.2 Módulo de Elasticidad

Uno de los valores importantes en el diseño de concreto reforzado es el módulo de elasticidad, este influye en las deflexiones, derivas y rigidez de una estructura. El módulo de elasticidad del concreto tiene una relación directa entre el esfuerzo que experimenta el material y la correspondiente deformación unitaria. Es un valor que permitirá evaluar inicialmente el tipo de desempeño esperado y el punto de partida para el análisis estructural. Altos módulos de elasticidad permiten beneficios en control de fisuras, evitar costos de mantenimiento e incremento de la vida útil.

La mezcla convencional de 21 MPa posee un módulo de elasticidad nominal según la NSR10  $E_c=4700*(21^{0.5})=21538$  MPa, que se ha considerado suficiente para satisfacer las sollicitaciones y economía de los proyectos. En el presente capítulo se pretende obtener el módulo de elasticidad de cuatro tipo de mezclas, Véase (Tabla 16), determinar la confiabilidad de los datos registrados y conocer la magnitud de los módulos que podemos obtener con cada mezcla.

**Tabla 16. Esquema para módulo de elasticidad**

Mezcla		Cantidad
PSI	MPa	(Probeta 4X8")
3000	21	2
6000	42	2
7000	49	2
8000	56	2

El montaje desarrollado en laboratorio para la obtención del módulo de elasticidad de 21, 42, 49 y 56 MPa, se observa en la Fotografía 28.

### Fotografía 28. Montaje para la obtención del módulo de elasticidad



A continuación se presentan los datos obtenidos en laboratorio (esfuerzos vs deformación unitaria) para el módulo de elasticidad, iniciando con la mezcla patrón de uso común de 21 MPa y continuando con las mezclas de 42,49 y 56 MPa. Al final se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos en el laboratorio aplicando la norma ASTM-C469 y comparándola con la norma nacional NSR10 y el ACI-318S-11.

**Tabla 17. Módulo de Elasticidad– Primera Muestra (21 MPa)**

Muestra No	2428-A	
Referencia	21	MPa
Diámetro	10	Cm
Altura	20.2	Cm

Carga (kg)	Deformación (0,01)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm)	$\epsilon$ $10^{-6}$
1000	0.30	1.25	0.00	15
2000	0.50	2.50	0.01	25
3000	3.00	3.75	0.03	149
4000	3.50	5.00	0.04	173
5000	4.50	6.25	0.05	223

6000	6.00	7.49	0.06	297
7000	6.50	8.74	0.07	322
8000	7.50	9.99	0.08	371
9000	9.00	11.24	0.09	446
10000	10.00	12.49	0.10	495
12000	12.50	14.99	0.13	619
14000	16.00	17.49	0.16	792
16000	19.50	19.98	0.20	965
18000	24.00	22.48	0.24	1188
20000	30.50	24.98	0.31	1510
20800	34.00	25.98	0.34	1683
Resistencia ultima $f'_c$ =		<b>25.98</b>		

*Análisis de resultados:* Tabla 17

Para una muestra identificada como 2428-A, con una referencia de resistencia de 21 MPa, se obtienen los incrementos de carga con su respectiva deformación y se calculan los esfuerzos y deformación unitaria. La máxima resistencia registrada es de 25.98 MPa, con una deformación unitaria  $1683 \cdot 10^{-6}$ . La resistencia alcanzada en laboratorio excede en un 24% la resistencia nominal. Véase (Figura 12).

**Tabla 18. Calculo Modulo de Elasticidad- Primera Muestra (21MPa)**

Puntos de Segmento de Recta	(MPa)	( $10^{-6}$ )
A	1.91	50
B	10.39	391

Módulo de elasticidad obtenido en laboratorio ASTM-C469

E (MPa)=	<b>24879</b>
----------	--------------

Módulo de elasticidad calculado con la norma NSR10

E (MPa)=	<b>23956</b>	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$
----------	--------------	-------------------------

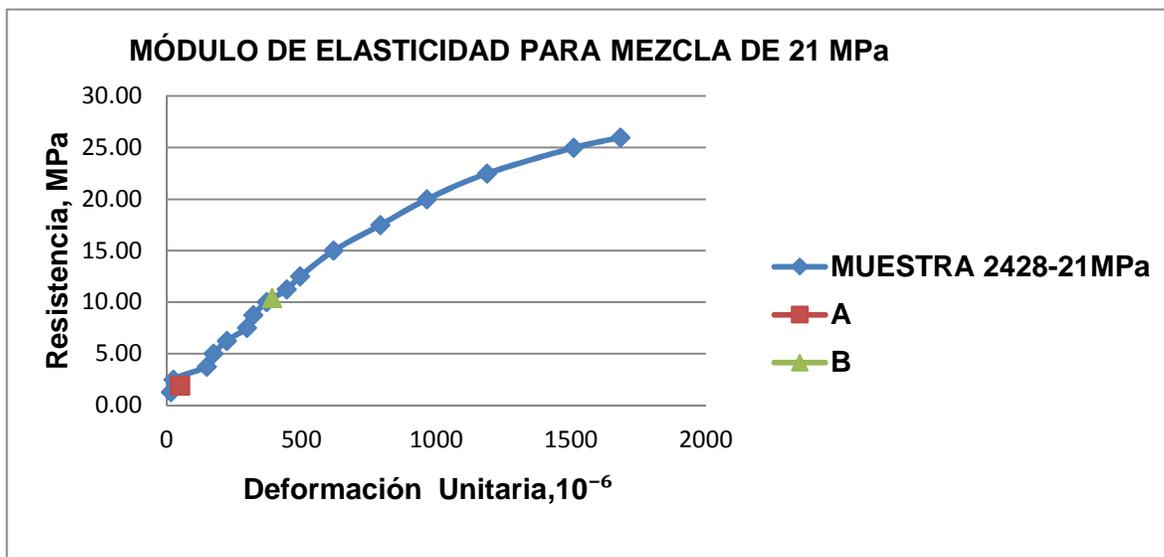
Módulo de elasticidad calculado con el ACI-318S-11

E (PSi)=	<b>3472538</b>	$E_c = 5700Q\sqrt{f'c}$
E (MPa)=	<b>24308</b>	

Análisis de resultados: Tabla 18

Por medio de los procedimientos de la norma ASTM-C469 se obtiene los puntos de segmento de recta de esfuerzo y deformación unitaria, con los cuales se calcula el módulo de elasticidad, Véase (Figura 12). Aplicando la norma ACI-318S-11 y NSR 10 con la resistencia de laboratorio, los módulos de elasticidad difieren del orden del 2 y 4% respectivamente con respecto a la norma ASTM-C469.

**Figura 12. Curva típica de esfuerzos-deformación-Primera Muestra (21 MPa)**



**Tabla 19. Módulo de Elasticidad – Segunda Muestra (21 MPa)**

Muestra No	2428-B	
Referencia	21	MPa
Diámetro	10	cm
Altura	20.2	cm

<b>Carga (kg)</b>	<b>Deformación (0,01)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación (mm)</b>	<b><math>\epsilon</math> 10<sup>-6</sup></b>
1000	0.50	1.25	0.01	25
2000	1.30	2.50	0.01	64
3000	2.50	3.75	0.03	124
4000	3.50	5.00	0.04	173
5000	4.00	6.25	0.04	198
6000	5.30	7.49	0.05	262
7000	6.00	8.74	0.06	297
8000	7.50	9.99	0.08	371
9000	8.50	11.24	0.09	421
10000	9.00	12.49	0.09	446
12000	11.50	14.99	0.12	569
14000	14.00	17.49	0.14	693
16000	17.00	19.98	0.17	842
18000	20.00	22.48	0.20	990
20000	24.00	24.98	0.24	1188
22000	28.50	27.48	0.29	1411
23000	40.50	28.73	0.41	2005
Resistencia ultima $f'c=$		<b>28.73</b>		

*Análisis de resultados:* Tabla 19

Para una muestra identificada como 2428-B, con una referencia de resistencia de 21 MPa, se obtienen los incrementos de carga con su respectiva deformación y se calculan los esfuerzos y deformación unitaria. La máxima resistencia registrada es de 28.73 MPa, con una deformación unitaria 2005 10<sup>-6</sup>. La resistencia alcanzada en laboratorio excede en un 37% la resistencia nominal. Véase (Figura 13).

En comparación entre las muestras, la segunda muestra alcanza un 11% más de resistencia, acompañada con 19% más de deformación unitaria.

**Tabla 20. Calculo Modulo de Elasticidad- Segunda Muestra (21MPa)**

<b>Puntos de Segmento de Recta</b>	<b>(Mpa)</b>	<b>(10<sup>-6</sup>)</b>
A	2.05	50
B	11.49	416

Módulo de elasticidad obtenido en laboratorio ASTM-C469

E (MPa)=	<b>25820</b>
----------	--------------

Módulo de elasticidad calculado con la norma NSR10

E (MPa)=	<b>25191</b>	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$
----------	--------------	-------------------------

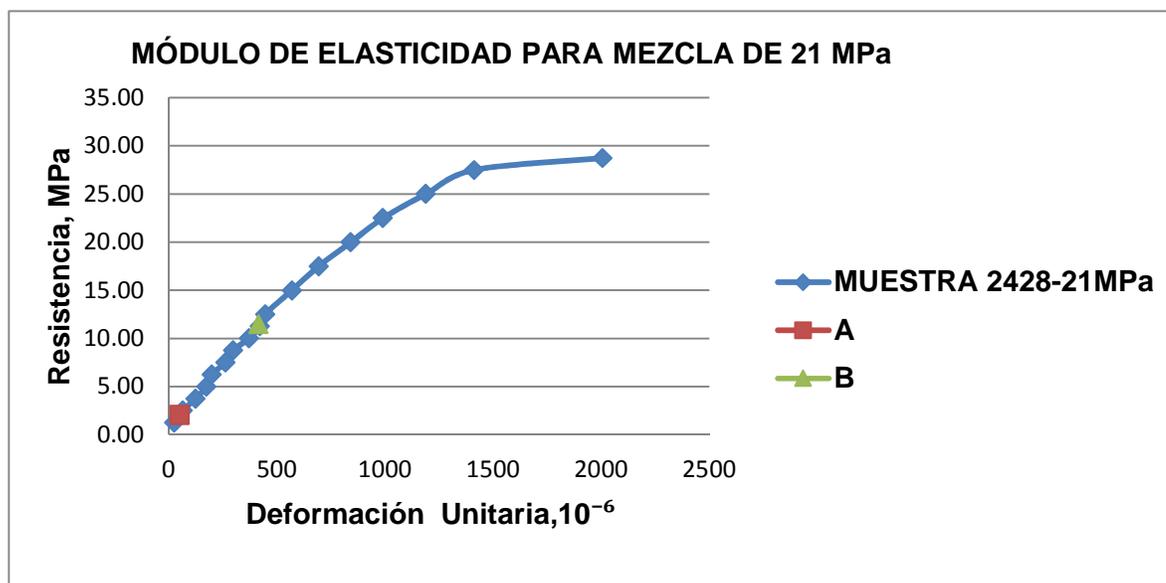
Módulo de elasticidad calculado con el ACI-318S-11

E (PSi)=	<b>3651567</b>	$E_c = 5700Q\sqrt{f'_c}$
E (MPa)=	<b>25561</b>	

*Análisis de resultados: Tabla 20*

Por medio de los procedimientos de la norma ASTM-C469 se obtiene los puntos de segmento de recta de esfuerzo y deformación unitaria, con los cuales se calcula el módulo de elasticidad, Véase (Figura 13). Aplicando la norma ACI-318S-11 y NSR 10 con la resistencia de laboratorio, los módulos de elasticidad difieren del orden del 1 y 2% respectivamente con respecto a la norma ASTM-C469.

**Figura 13. Curva típica de esfuerzos-deformación-Segunda Muestra (21 MPa)**



**Tabla 21. Módulo de Elasticidad – Primera Muestra (42MPa)**

Muestra No	2427-A	
Referencia	42	MPa
Diámetro	10	cm
Altura	19.9	cm

Carga (kg)	Deformación (0,01)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm)	$\epsilon$ $10^{-6}$
1000	0.10	1.25	0.00	5
2000	1.50	2.50	0.02	75
3000	2.00	3.75	0.02	101
4000	3.50	5.00	0.04	176
5000	4.20	6.25	0.04	211
6000	5.00	7.49	0.05	251
7000	6.10	8.74	0.06	307
8000	7.10	9.99	0.07	357
10000	8.30	12.49	0.08	417
12000	9.50	14.99	0.10	477

14000	11.50	17.49	0.12	578
16000	14.00	19.98	0.14	704
18000	16.00	22.48	0.16	804
20000	18.00	24.98	0.18	905
22000	20.00	27.48	0.20	1005
24000	23.00	29.98	0.23	1156
26000	26.00	32.48	0.26	1307
28000	29.00	34.97	0.29	1457
30000	33.00	37.47	0.33	1658
33400	39.00	41.72	0.39	1960
Resistencia ultima $f'_c$ =		<b>42</b>		

*Análisis de resultados: Tabla 21*

Para una muestra identificada como 2427-A, con una referencia de resistencia de 42 MPa, se obtienen los incrementos de carga con su respectiva deformación y se calculan los esfuerzos y deformación unitaria. La máxima resistencia registrada es de 41.72 MPa, con una deformación unitaria 1960  $10^{-6}$ . La resistencia alcanzada en laboratorio es del 99% de la resistencia nominal. Véase (Figura 14).

**Tabla 22. Calculo Modulo de Elasticidad- Primera Muestra (42MPa)**

Puntos de Segmento de Recta	(Mpa)	( $10^{-6}$ )
A	2.05	50
B	16.69	554

Módulo de elasticidad obtenido en laboratorio ASTM-C469

E (MPa)=	<b>29030</b>
----------	--------------

Módulo de elasticidad calculado con la norma NSR10

E (MPa)=	<b>30357</b>	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$
----------	--------------	-------------------------

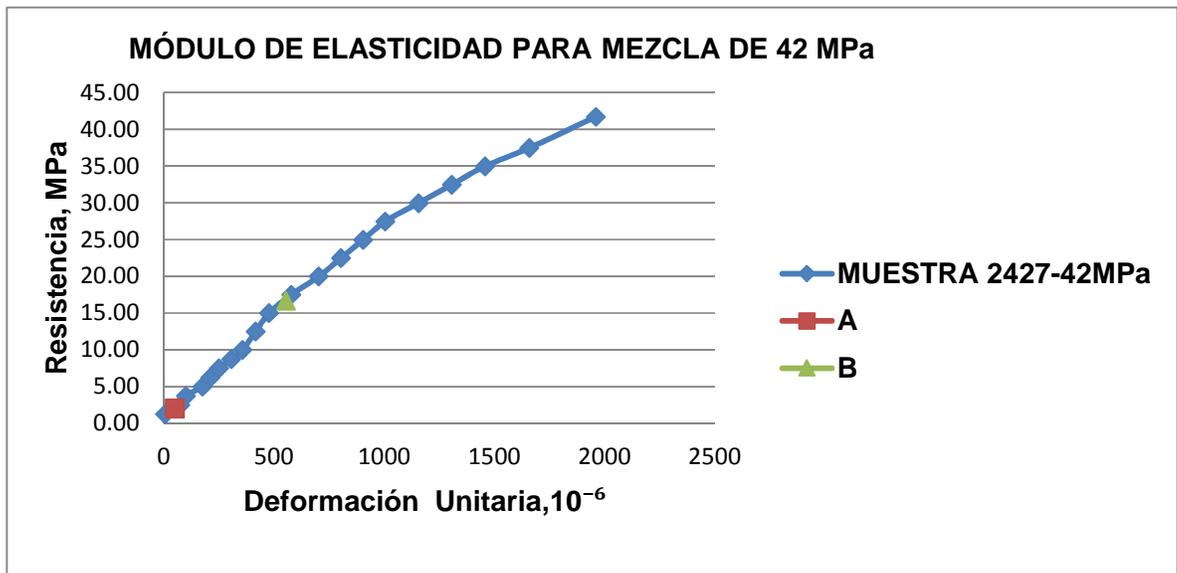
Módulo de elasticidad calculado con el ACI-318S-11

E (PSi)=	<b>4400364</b>	$E_c = 57000\sqrt{f'_c}$
E (MPa)=	<b>30803</b>	

*Análisis de resultados: Tabla 22*

Por medio de los procedimientos de la norma ASTM-C469 se obtiene los puntos de segmento de recta de esfuerzo y deformación unitaria, con los cuales se calcula el módulo de elasticidad, Véase (Figura 14). Aplicando la norma NSR 10 y ACI-318S-11 con la resistencia de laboratorio, los módulos de elasticidad difieren del orden del 4 y 6% respectivamente con respecto a la norma ASTM-C469

**Figura 14. Curva típica de esfuerzos-deformación-Primera Muestra (42 MPa)**



**Tabla 23. Módulo de Elasticidad – Segunda Muestra (42MPa)**

Muestra No	2427-B	
Referencia	42	MPa
Diámetro	10.1	cm
Altura	20.1	cm

<b>Carga (kg)</b>	<b>Deformación (0,01)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación (mm)</b>	<b><math>\epsilon</math> <math>10^{-6}</math></b>
1000	0.00	1.22	0.00	0
2000	0.80	2.45	0.01	40
3000	1.50	3.67	0.02	75
4000	2.50	4.90	0.03	124
5000	3.00	6.12	0.03	149
6000	4.00	7.35	0.04	199
7000	4.80	8.57	0.05	239
8000	5.50	9.80	0.06	274
9000	6.80	11.02	0.07	338
10000	7.50	12.24	0.08	373
14000	10.00	17.14	0.10	498
16000	12.00	19.59	0.12	597
18000	14.50	22.04	0.15	721
20000	17.00	24.49	0.17	846
22000	19.50	26.94	0.20	970
24000	22.00	29.39	0.22	1095
26000	25.50	31.84	0.26	1269
28000	29.00	34.28	0.29	1443
30000	34.00	36.73	0.34	1692
34000	49.00	41.63	0.49	2438
Resistencia ultima $f'c=$		<b>42</b>		

*Análisis de resultados: Tabla 23*

Para una muestra identificada como 2427-B, con una referencia de resistencia de 42 MPa, se obtienen los incrementos de carga con su respectiva deformación y se calculan los esfuerzos y deformación unitaria. La máxima resistencia registrada es de 41.63 MPa, con una deformación unitaria 2438  $10^{-6}$ . La resistencia alcanzada en laboratorio es del 99% de la resistencia nominal. Véase (Figura 15).

En comparación entre las muestras, la segunda muestra alcanza un 0.20% menos de resistencia, acompañada con 24% más de deformación unitaria.

**Tabla 24. Calculo Modulo de Elasticidad- Segunda Muestra (42MPa)**

<b>Puntos de Segmento de Recta</b>	<b>(Mpa)</b>	<b>(10<sup>-6</sup>)</b>
A	2.87	50
B	16.65	507

Módulo de elasticidad obtenido en laboratorio ASTM-C469

E (MPa)=	<b>30138</b>
----------	--------------

Módulo de elasticidad calculado con la norma NSR10

E (MPa)=	<b>30325</b>	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$
----------	--------------	-------------------------

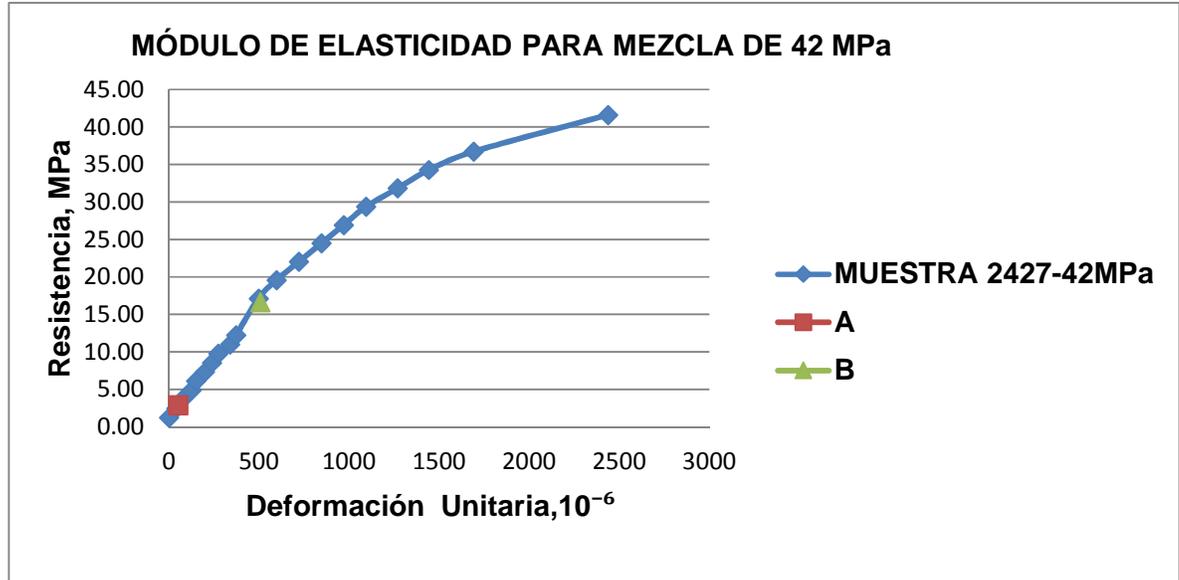
Módulo de elasticidad calculado con el ACI-318S-11

E (PSi)=	<b>4395755</b>	$E_c = 5700Q\sqrt{f'_c}$
E (MPa)=	<b>30770</b>	

**FAnálisis de resultados: Tabla 24**

Por medio de los procedimientos de la norma ASTM-C469 se obtiene los puntos de segmento de recta de esfuerzo y deformación unitaria, con los cuales se calcula el módulo de elasticidad, Véase (Figura 15). Aplicando la norma NSR 10 y ACI-318S-11 con la resistencia de laboratorio, los módulos de elasticidad difieren del orden del 1 y 2% respectivamente con respecto a la norma ASTM-C469

**Figura 15. Curva típica de esfuerzos-deformación-Segunda Muestra (42 MPa)**



**Tabla 25. Módulo de Elasticidad – Primera Muestra (49MPa)**

Muestra No	2424-A	
Referencia	49	MPa
Diámetro	9.9	cm
Altura	19.8	cm

Carga (kg)	Deformación (0,01)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm)	$\epsilon$ $10^{-6}$
2000	0.90	2.55	0.01	45
4000	2.00	5.10	0.02	101
6000	3.50	7.65	0.04	177
8000	5.50	10.20	0.06	278
10000	7.00	12.74	0.07	354
12000	9.00	15.29	0.09	455
14000	11.00	17.84	0.11	556
16000	12.50	20.39	0.13	631
18000	14.60	22.94	0.15	737
20000	17.00	25.49	0.17	859

22000	18.50	28.04	0.19	934
24000	21.00	30.59	0.21	1061
26000	23.00	33.13	0.23	1162
28000	25.00	35.68	0.25	1263
30000	27.50	38.23	0.28	1389
32000	30.00	40.78	0.30	1515
34000	33.50	43.33	0.34	1692
36000	36.00	45.88	0.36	1818
38000	39.00	48.43	0.39	1970
39800	49.00	50.72	0.49	2475
Resistencia ultima $f'c=$		<b>51</b>		

*Análisis de resultados: Tabla 25*

Para una muestra identificada como 2424-A, con una referencia de resistencia de 49 MPa, se obtienen los incrementos de carga con su respectiva deformación y se calculan los esfuerzos y deformación unitaria. La máxima resistencia registrada es de 50.72 MPa, con una deformación unitaria  $2475 \cdot 10^{-6}$ . La resistencia alcanzada en laboratorio excede en un 3.5% la resistencia nominal. Véase (Figura 16).

**Tabla 26. Calculo Modulo de Elasticidad- Primera Muestra (49MPa)**

Puntos de Segmento de Recta	(Mpa)	( $10^{-6}$ )
A	2.76	50
B	20.29	628

Módulo de elasticidad obtenido en laboratorio ASTM-C469

E (MPa)=	<b>30316</b>
----------	--------------

Módulo de elasticidad calculado con la norma NSR10

E (MPa)=	<b>33473</b>	$E_c = 4700\sqrt{f'c}$
----------	--------------	------------------------

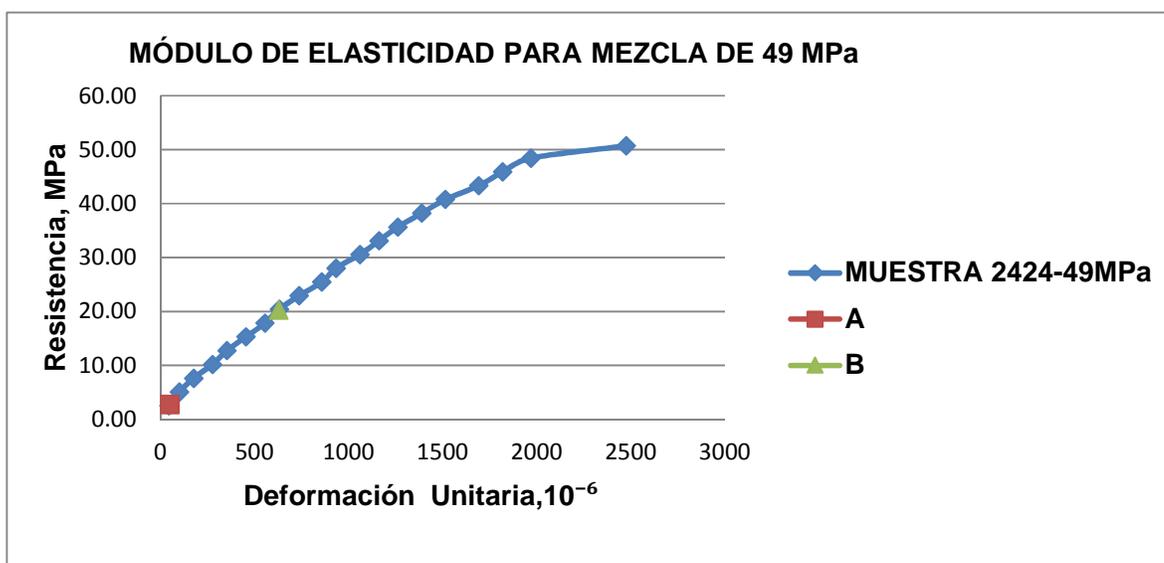
Módulo de elasticidad calculado con el ACI-318S-11

E (PSi)=	<b>4852011</b>	$E_c = 57000\sqrt{f'_c}$
E (MPa)=	<b>33964</b>	

Análisis de resultados: Tabla 26

Por medio de los procedimientos de la norma ASTM-C469 se obtiene los puntos de segmento de recta de esfuerzo y deformación unitaria, con los cuales se calcula el módulo de elasticidad, Véase (Figura 16). Aplicando la norma NSR 10 y ACI-318S-11 con la resistencia de laboratorio, los módulos de elasticidad difieren del orden del 9 y 11% respectivamente con respecto a la norma ASTM-C469

**Figura 16. Curva típica de esfuerzos-deformación-Primera Muestra (49 MPa)**



**Tabla 27. Módulo de Elasticidad – Segunda Muestra (49MPa)**

Muestra No	2424-B	
Referencia	49	MPa
Diámetro	10.1	cm
Altura	20	cm

<b>Carga (kg)</b>	<b>Deformación (0,01)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación (mm)</b>	<b><math>\epsilon</math> 10<sup>-6</sup></b>
2000	1.00	2.45	0.01	50
4000	2.20	4.90	0.02	110
6000	3.90	7.35	0.04	195
8000	5.20	9.80	0.05	260
10000	7.00	12.24	0.07	350
12000	8.50	14.69	0.09	425
14000	10.00	17.14	0.10	500
16000	12.00	19.59	0.12	600
18000	13.20	22.04	0.13	660
20000	15.00	24.49	0.15	750
22000	16.50	26.94	0.17	825
24000	18.00	29.39	0.18	900
26000	19.50	31.84	0.20	975
28000	21.00	34.28	0.21	1050
30000	23.00	36.73	0.23	1150
32000	24.10	39.18	0.24	1205
34000	26.00	41.63	0.26	1300
36000	28.00	44.08	0.28	1400
38000	29.30	46.53	0.29	1465
45200	40.00	55.34	0.40	2000
Resistencia ultima $f'c=$		<b>55</b>		

*Análisis de resultados: Tabla 27*

Para una muestra identificada como 2424-B, con una referencia de resistencia de 49 MPa, se obtienen los incrementos de carga con su respectiva deformación y se calculan los esfuerzos y deformación unitaria. La máxima resistencia registrada es de 55.34 MPa, con una deformación unitaria 2000  $10^{-6}$ . La resistencia alcanzada en laboratorio excede en un 13% la resistencia nominal. Véase (Figura 17).

En comparación entre las muestras, la segunda muestra alcanza un 9% más de resistencia, acompañada con 24% menos de deformación unitaria.

**Tabla 28. Calculo Modulo de Elasticidad- Segunda Muestra (49MPa)**

<b>Puntos de Segmento de Recta</b>	<b>(Mpa)</b>	<b>(10<sup>-6</sup>)</b>
A	2.45	50
B	22.14	678

Módulo de elasticidad obtenido en laboratorio ASTM-C469

E (MPa)=	<b>31352</b>
----------	--------------

Módulo de elasticidad calculado con la norma NSR10

E (MPa)=	<b>34965</b>	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$
----------	--------------	-------------------------

Módulo de elasticidad calculado con el ACI-318S-11

E (PSi)=	<b>5068311</b>	$E_c = 5700Q\sqrt{f'_c}$
E (MPa)=	<b>35478</b>	

*Análisis de resultados: Tabla 28*

Por medio de los procedimientos de la norma ASTM-C469 se obtiene los puntos de segmento de recta de esfuerzo y deformación unitaria, con los cuales se calcula el módulo de elasticidad, Véase (Figura 17). Aplicando la norma NSR 10 y ACI-318S-11 con la resistencia de laboratorio, los módulos de elasticidad difieren del orden del 10 y 12% respectivamente con respecto a la norma ASTM-C469

Figura 17. Curva típica de esfuerzos-deformación-Segunda Muestra (49 MPa)

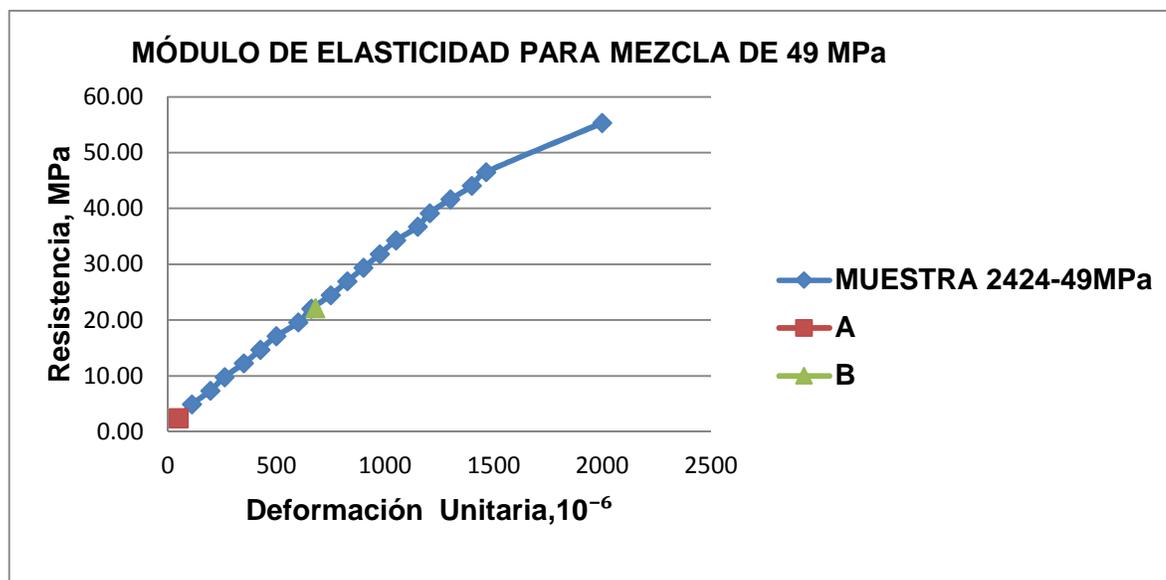


Tabla 29. Módulo de Elasticidad – Primera Muestra (56MPa)

Muestra No	2423-A	
Referencia	56	MPa
Diámetro	10	cm
Altura	20.1	cm

Carga (kg)	Deformación (0,01)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm)	$\epsilon$ $10^{-6}$
1000	1.10	1.25	0.01	55
2000	1.30	2.50	0.01	65
3000	2.00	3.75	0.02	100
4000	2.90	5.00	0.03	144
6000	4.10	7.49	0.04	204
8000	5.50	9.99	0.06	274
10000	7.10	12.49	0.07	353
12000	8.50	14.99	0.09	423
14000	10.00	17.49	0.10	498
16000	11.50	19.98	0.12	572

18000	12.90	22.48	0.13	642
20000	14.30	24.98	0.14	711
22000	16.00	27.48	0.16	796
24000	17.10	29.98	0.17	851
26000	18.90	32.48	0.19	940
28000	20.10	34.97	0.20	1000
30000	21.90	37.47	0.22	1090
32000	23.00	39.97	0.23	1144
34000	25.00	42.47	0.25	1244
44800	40.00	55.96	0.40	1990
Resistencia ultima $f'c=$		<b>56</b>		

*Análisis de resultados: Tabla 29*

Para una muestra identificada como 2423-A, con una referencia de resistencia de 56 MPa, se obtienen los incrementos de carga con su respectiva deformación y se calculan los esfuerzos y deformación unitaria. La máxima resistencia registrada es de 55.96 MPa, con una deformación unitaria 1990  $10^{-6}$ . La resistencia alcanzada en laboratorio es de un 99.93% de la resistencia nominal. Véase (Figura 18).

**Tabla 30. Calculo Modulo de Elasticidad- Primera Muestra (56MPa)**

Puntos de Segmento de Recta	(Mpa)	( $10^{-6}$ )
A	0.66	50
B	22.38	639

Módulo de elasticidad obtenido en laboratorio ASTM-C469

E (MPa)=	<b>36888</b>
----------	--------------

Módulo de elasticidad calculado con la norma NSR10

E (MPa)=	<b>35158</b>	$E_c = 4700\sqrt{f'c}$
----------	--------------	------------------------

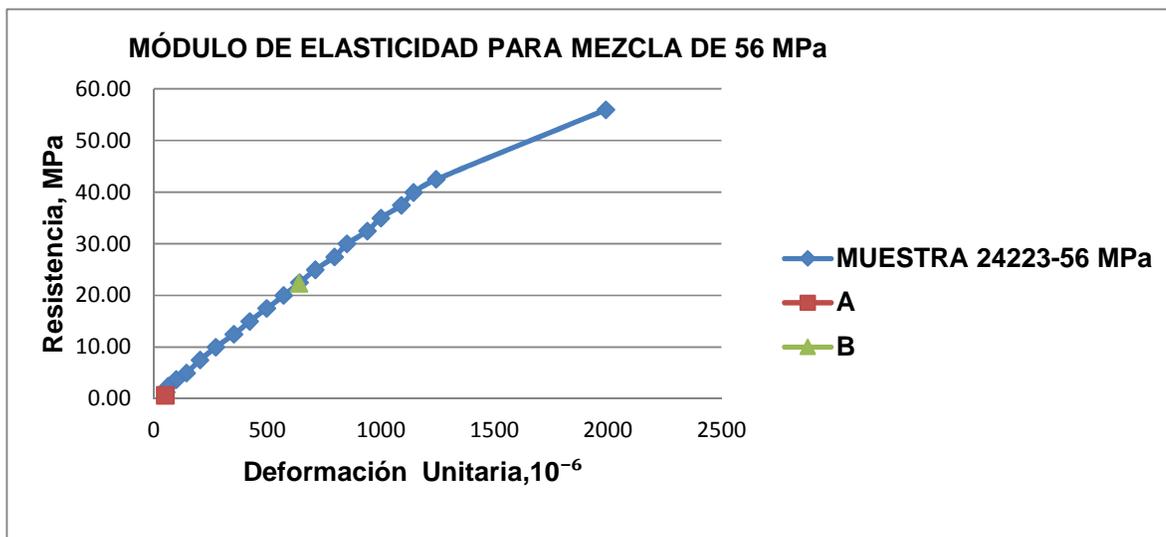
Módulo de elasticidad calculado con el ACI-318S-11

E (PSi)=	<b>5096293</b>	$E_c = 57000\sqrt{f'_c}$
E (MPa)=	<b>35674</b>	

Análisis de resultados: Tabla 30

Por medio de los procedimientos de la norma ASTM-C469 se obtiene los puntos de segmento de recta de esfuerzo y deformación unitaria, con los cuales se calcula el módulo de elasticidad, Véase (Figura 18). Aplicando la norma ACI-318S-11 y NSR 10 con la resistencia de laboratorio, los módulos de elasticidad difieren del orden del 3 y 5% respectivamente con respecto a la norma ASTM-C469

Figura 18. Curva típica de esfuerzos-deformación-Primera Muestra (56 MPa)



**Tabla 31. Módulo de Elasticidad – Segunda Muestra (56MPa)**

Muestra No	2423-B	
Referencia	56	MPa
Diámetro	10	cm
Altura	20	cm

<b>Carga (kg)</b>	<b>Deformación (0,01)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación (mm)</b>	<b><math>\epsilon</math> 10<sup>-6</sup></b>
2000	0.90	2.50	0.01	45
4000	1.20	5.00	0.01	60
6000	2.10	7.49	0.02	105
8000	3.10	9.99	0.03	155
10000	4.50	12.49	0.05	225
12000	6.00	14.99	0.06	300
14000	7.50	17.49	0.08	375
16000	9.10	19.98	0.09	455
18000	10.50	22.48	0.11	525
20000	12.00	24.98	0.12	600
22000	13.50	27.48	0.14	675
24000	15.00	29.98	0.15	750
26000	16.50	32.48	0.17	825
28000	18.60	34.97	0.19	930
30000	19.00	37.47	0.19	950
32000	21.50	39.97	0.22	1075
34000	23.00	42.47	0.23	1150
36000	25.00	44.97	0.25	1250
40000	29.00	49.96	0.29	1450
44000	39.00	54.96	0.39	1950
Resistencia ultima $f'c=$		<b>55</b>		

*Análisis de resultados: Tabla 31*

Para una muestra identificada como 2423-B, con una referencia de resistencia de 56 MPa, se obtienen los incrementos de carga con su respectiva deformación y se calculan los esfuerzos y deformación unitaria. La máxima resistencia registrada es de 54.96 MPa, con una deformación unitaria 1950  $10^{-6}$ . La resistencia alcanzada en laboratorio es de un 98% de la resistencia nominal. Véase (Figura 19).

En comparación entre las muestras, la segunda muestra alcanza un 1.8% menos de resistencia, acompañada con 2% menos de deformación unitaria.

**Tabla 32. Calculo Modulo de Elasticidad-Segunda Muestra (56MPa)**

<b>Puntos de Segmento de Recta</b>	<b>(Mpa)</b>	<b>(10<sup>-6</sup>)</b>
A	3.33	50
B	21.98	513

Módulo de elasticidad obtenido en laboratorio ASTM-C469

E (MPa)=	<b>40286</b>
----------	--------------

Módulo de elasticidad calculado con la norma NSR10

E (MPa)=	<b>34843</b>	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$
----------	--------------	-------------------------

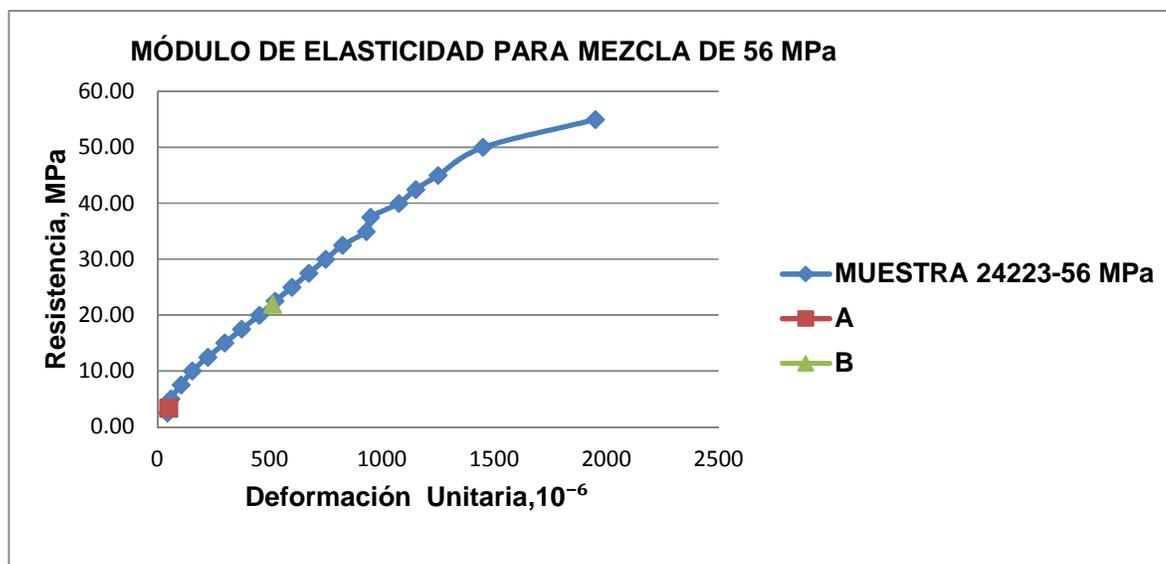
Módulo de elasticidad calculado con el ACI-318S-11

E (PSi)=	<b>5050586</b>	$E_c = 5700Q\sqrt{f'_c}$
E (MPa)=	<b>35354</b>	

*Análisis de resultados: Tabla 32*

Por medio de los procedimientos de la norma ASTM-C469 se obtiene los puntos de segmento de recta de esfuerzo y deformación unitaria, con los cuales se calcula el módulo de elasticidad, Véase (Figura 19). Aplicando la norma ACI-318S-11 y NSR 10 con la resistencia de laboratorio, los módulos de elasticidad difieren del orden del 14 y 16% respectivamente con respecto a la norma ASTM-C469.

**Figura 19. Curva típica de esfuerzos-deformación-Segunda Muestra (56 MPa)**



A continuación se presenta un resumen de los datos obtenidos.

**Tabla 33. Resumen resultados de módulo de elasticidad**

Muestra	Relacion agua/ material cementante	Resistencia Nominal		Modulo de Elasticidad, Ec=				Desviación estándar		Lab/ NSR10	Lab/ ACI-318S-11
				Laboratorio ASTM-C469		NSR10	ACI-318S-11				
				MPa	PSi	MPa	MPa				
2423-A	0.33	56	8000	36888	5343517	35158	35674	725	2.0	105	103
2423-B	0.33	56	8000	40286	5835761	34843	35354	2454	6.7	116	114
2424-A	0.38	49	7000	30316	4391518	33473	33964	1616	5.0	91	89
2424-B	0.38	49	7000	31352	4541563	34965	35478	1836	5.4	90	88
2427-A	0.43	42	6000	29030	4205161	30357	30803	753	2.5	96	94
2427-B	0.43	42	6000	30138	4365778	30325	30770	265	0.9	99	98
2428-A	0.67	21	3000	24879	3603995	23956	24308	380	1.6	104	102
2428-B	0.67	21	3000	25820	3740193	25191	25561	258	1.0	102	101

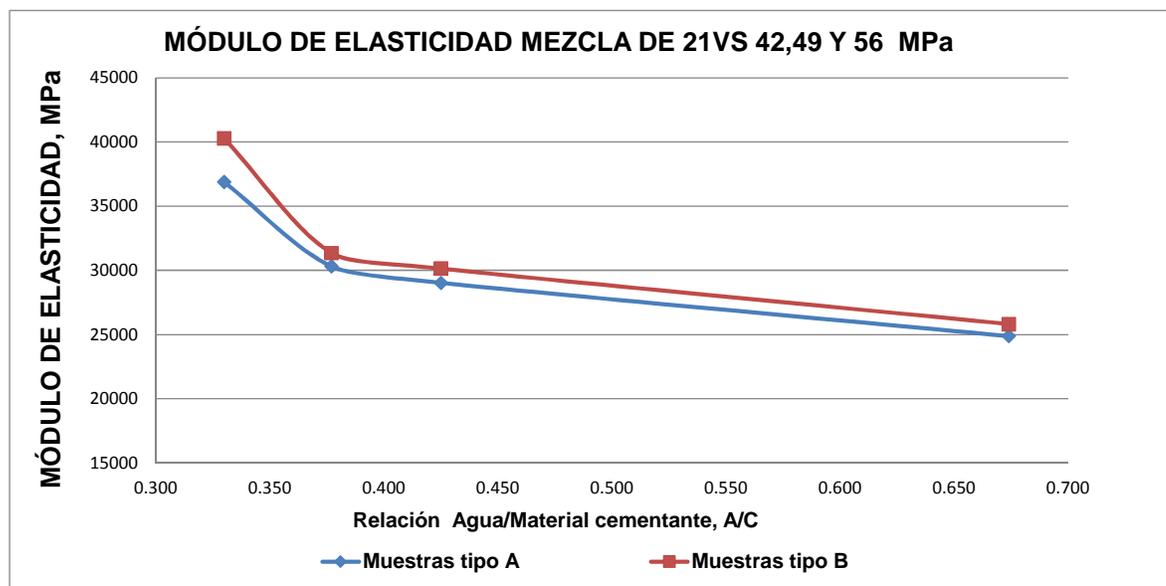
*Análisis de resultados: Tabla 33*

Para la determinación del módulo de elasticidad se procede a un esquema de ensayo, Véase (Tabla 16), el cual define tomar dos muestras por cada tipo de mezcla 21, 42, 49, 56 MPa. A estas muestras se les asigna un número de identificación el cual sirve para el registro de edad y curado en laboratorio.

En el resumen de módulos de elasticidad de las diferentes mezclas se procede a determinar la dispersión de las magnitudes registradas para verificar su grado de confiabilidad. Las mezclas poseen a razón porcentual entre normas, del orden del 88% como el valor más crítico (procedimiento ASTM-C469/ ACI-318S-11, muestra 2424-B), por su parte las desviación estándar varían del 0.9% (mezcla 2427-B) al 6.7% (mezcla 2423-B), a razón de la media aritmética. Lo que permite concluir que el procedimiento realizado por medio de la norma ASTM-C469, con respecto a la aplicación de las formulas teóricas de las normas NSR10 y ACI-318S-11, poseen una alta relación y permiten determinar una confiabilidad de los datos obtenidos en el laboratorio.

En mezclas de 42, 49 y 56 MPa, se registró un incremento de magnitud de módulo de elasticidad del orden del 17% ,21%, 40% respectivamente, en comparación a la mezcla de uso convencional de 21 MPa.

**Figura 20. Comparación entre módulo de elasticidad y relación Agua/ Material cementante**



*Análisis de resultados: Figura 20*

Como se puede observar la relación agua material cementante aparte de incidir en la resistencias de las mezclas, desarrolla en las mismas altos módulos de elasticidad.

En la *Figura 20*, es evidente que existe una relación inversa entre la magnitud de módulo de elasticidad y la relación agua material cementante, donde se identifica un segmento recto y otro con tendencia exponencial, lo que quiere decir, que a medida que se favorezca la reducción de la relación agua material cementante, exponencialmente obtendremos beneficios de módulos de elasticidad, resistencia y otras cualidades de desempeño que posteriormente en el documento se trataran.

## **7.2 Caracterización de algunos Parámetros más Relevantes de Durabilidad y Alto Desempeño.**

La durabilidad y el desempeño en los concreto hace referencia en garantizar la vida de servicio de las estructuras en un medio ambiente específico, preservando propiedades principales de seguridad y estética, que eviten costos de mantenimiento e interrupciones de servicio. La durabilidad y desempeño relacionan la capacidad de resistir, la acción de agentes agresivos, ataque de sustancias químicas, abrasión, sollicitaciones de servicio de la estructura.

La durabilidad y el desempeño están en función de la dosificación de la mezcla, ambientes de exposición, uso y logísticas de colocación en obra, del adecuado análisis de las sollicitaciones de servicio, de especificaciones de materiales, técnicas de producción, proceso constructivo y el tiempo.

Una apropiada selección de relación agua/material cementante, mejora las propiedades de desempeño del concreto y disminuye la porosidad. Aportará al material características de composición y comportamiento más durable evitando los procesos de deterioro.

A continuación se presentan los parámetros analizados en este documento para caracterizar el desempeño y la durabilidad, empleados convencionalmente en el medio industrial. Se realiza una metodología de ensayo por cada parámetro con sus respectivas normas, para las cuatro mezclas 21, 42, 49 y 56 MPa. Al final se comparan las ventajas registradas por cada una de las mezclas con respecto a la mezcla de uso convencional de 21 MPa, estos parámetros son:

- Sortividad o absorción
- Permeabilidad
- Penetración ion cloruro
- Coeficiente de difusión

- Resistencia a la carbonatación
- Resistencia a la abrasión

### 7.2.1 Sortividad

El ensayo de sortividad permite encontrar la rata de absorción de agua por parte del concreto, midiendo el incremento de la masa por absorción, en función del tiempo, cuando solo una superficie es expuesta al agua.

Es un parámetro directamente asociado a la durabilidad de las estructuras de concreto, por relacionar la velocidad de succión con los cambios de características de las mezclas, principalmente de curado.

No es suficiente considerar la presencia de poros en el concreto, es necesario conocer su distribución y mecanismos de transporte. Dos mezclas con igual porosidad pero distinta conectividad tendrán un comportamiento diferente, los concretos con poros interconectados afectaran su durabilidad. Los capilares influyen en los mecanismos de transporte de sustancias al concreto, la absorción capilar es el mecanismo de transferencia de líquidos más rápido. Una herramienta confiable para caracterizar un concreto en forma comparativa, es la determinación de la capacidad de absorción capilar.

La existencia de los canales capilares, que se forman como consecuencia del fenómeno de exudación, puede actuar y afectar el concreto de una de las siguientes maneras:

- El concreto en contacto con sustancias químicas en solución en el agua, pueden reaccionar y dan como resultado sustancias solubles que restan la cohesión de la matriz (lixiviación de la cal).
- El concreto en contacto con sustancias químicas que forman compuestos expansivos que provocan esfuerzos de tracción, traen como consecuencia su agrietamiento (sulfoaluminato de calcio).
- Acción física de tracción, provocada por aumento de volumen del agua contenida en los canales capilares, cuando esta se congela, debido a bajas temperaturas.
- Reacción expansiva de los álcalis del cemento con ciertos agregados que pueden producirse en presencia de agua y dan lugar a agrietamiento del concreto por tracción.

A continuación se presentan los ensayos de porosidad y absorción de cuatro tipos de mezclas 21, 42, 49 y 56 MPa. Se establece un esquema de ensayo en el cual se presenta en la Tabla 34. Se realiza inicialmente la evaluación de la porosidad de las mezclas a través de los procedimientos establecidos por la norma ASTM C-642; estos datos se emplearán posteriormente en el ensayo de permeabilidad en el que se profundizará su incidencia. En una segunda parte por medio de los procedimientos establecidos por la norma ASTM C-1585-04 se procede a calcular la absorción de las mezclas 21, 42, 49 y 56 MPa y de igual manera se analiza sus respectivos resultados.

**Tabla 34. Esquema de ensayo de porosidad y sortividad**

Mezcla		Cantidad
PSI	MPa	(Probeta 4X8")
3000	21	2
6000	42	2
7000	49	2
8000	56	2

Se determina la porosidad porcentual a través de los procedimientos descritos en la norma la norma ASTM-C642, en la cual se obtiene los parámetros de la ecuación (7-1).

$$V(\%) = \frac{C - A}{C - D} \times 100$$

**7-1**

A = masa de la muestra secada al horno en el aire.

C = masa de la superficie seca de la muestra en el aire después de la inmersión e hirviendo.

D = masa aparente de la muestra en el agua después de la inmersión y el punto de ebullición.

En las Tabla 35, Tabla 36, Tabla 37 y Tabla 38, se observa los datos obtenidos en laboratorio y se determina la porosidad por medio de la ecuación (7-1).

**Tabla 35. Obtención de la porosidad para 21 MPa**

<b>Peso (Kg)- Porosidad %</b>		
<b>Mezcla 3000 PSi (21 MPa)</b>		
<b>Tipo de Peso</b>	<b>2428-1</b>	<b>2428-2</b>
<b>A</b>	887.1	901.8
<b>C</b>	941.0	950.7
<b>D</b>	409.9	413.3
<b>Porosidad, v %</b>	<b>10.15</b>	<b>9.10</b>

**Tabla 36. Obtención de la porosidad para 42 MPa**

<b>Peso (Kg)- Porosidad %</b>		
<b>Mezcla 6000 PSi (42 MPa)</b>		
<b>Tipo de Peso</b>	<b>2427-1</b>	<b>2427-2</b>
<b>A</b>	856.7	897.0
<b>C</b>	923.1	942.4
<b>D</b>	423.4	401.3
<b>Porosidad, v %</b>	<b>13.29</b>	<b>8.39</b>

**Tabla 37. Obtención de la porosidad para 49 MPa**

<b>Peso (Kg)- Porosidad %</b>		
<b>Mezcla 7000 PSi (49 MPa)</b>		
<b>Tipo de Peso</b>	<b>2424-1</b>	<b>2424-2</b>
<b>A</b>	958.0	941.0
<b>C</b>	1002.4	981.7
<b>D</b>	434.1	423.0
<b>Porosidad, v %</b>	<b>7.81</b>	<b>7.28</b>

**Tabla 38. Obtención de la porosidad para 56 MPa**

<b>Peso (Kg)- Porosidad %</b>		
<b>Mezcla 8000 PSi (56 MPa)</b>		
<b>Tipo de Peso</b>	<b>2423-1</b>	<b>2423-2</b>
<b>A</b>	934.0	948.3
<b>C</b>	971.5	980.2
<b>D</b>	419.0	412.9
<b>Porosidad, v %</b>	<b>6.79</b>	<b>5.62</b>

**Tabla 39. Resumen de porosidad de mezclas 21, 42, 49 y 56 MPa**

<b>Porosidad, v %</b>			
<b>Mezcla</b>	<b>a/c</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
3000 PSi/21 MPa	0.67	10.15	9.10
6000 PSi/42 MPa	0.43	13.29	8.39
7000 PSi/49 MPa	0.38	7.81	7.28
8000 PSi/56 MPa	0.33	6.79	5.62

*Análisis de resultados:* Tabla 39

La cantidad de poros en las mezclas ensayadas tienen un comportamiento directamente proporcional con la relación agua material cementante, e inversamente a su resistencia. La mezcla de 42 MPa posee una porosidad porcentual del orden de 13.29%, superior a la mezcla de 21 MPa. Como se ha comentado en este capítulo, no es suficiente considerar la presencia de poros en el concreto, es necesario conocer su distribución (conectividad) y mecanismos de transporte. Posteriormente esta porosidad nos permitirá determinar ensayos de permeabilidad, difusión, penetración de cloruros y carbonatación.

En una segunda parte del ensayo se determina la absorción de las mezclas 21, 42, 49 y 56 MPa, a través de los procedimientos descritos en la norma ASTM C-1585-04. Se obtienen en laboratorio los parámetros de la ecuación (7-2). Véase (Fotografía 29), la cual describe el montaje de las muestras para obtener la tasa de absorción.

**Fotografía 29. Montaje para la obtención de la Sortividad**



$$I = \frac{m_t}{a * d} \quad (7-2)$$

I= absorción mm

$m_t$  = El cambio en la masa del espécimen, en gramos, en el tiempo t,

a= el área expuesta de la muestra, en  $mm^2$

d= densidad del agua en  $\frac{g}{mm^3}$

En la Tabla 40 se registran el cambio de peso por absorción de agua de los especímenes con los siguientes tiempos: 1 min, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 1 hora, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 5 horas, 6 horas, 1 día, 2 días, 3 días, 4 días, 5 días, 6 días, 8 días. Por medio de la ecuación (7-2) obtenemos la absorción de dos muestras por cada tipo de mezcla, en función del tiempo.

**Tabla 40. Variación de peso por absorción de agua a través del tiempo**

Tiempo (S)	Tiempo (S <sup>1/2</sup> )	Masa (g)							
		3000 (PSi) /21(MPa)		6000 (PSi)/42(MPa)		7000 (PSi)/49(MPa)		8000 (PSi)/56(MPa)	
		2428-1	2428-2	2427-1	2427-2	2424-1	2424-2	2423-1	2423-2
0	0	905.3	918.5	874.0	915.7	975.9	960.9	952.6	964.0
60	8	906.9	920.2	875.4	917.0	976.6	961.5	953.1	964.5
300	17	909.0	922.2	877.0	918.4	977.6	962.1	954.0	964.5
600	24	911.1	924.7	878.7	920.2	978.7	962.4	954.9	965.4
1200	35	913.8	927.5	880.9	922.2	980.5	963.9	956.0	966.2
1800	42	917.6	930.6	883.0	924.9	982.3	965.2	957.2	967.0
3600	60	919.5	932.7	884.0	926.8	983.3	966.3	957.9	967.4
7200	85	922.1	935.2	885.7	927.8	984.4	966.6	958.6	967.9
10800	104	931.2	943.4	890.8	934.4	988.4	969.2	961.7	970.2
14400	120	933.0	945.5	892.1	936.4	989.7	969.9	962.5	971.0
18000	134	934.6	946.9	893.2	937.0	990.3	970.3	962.2	971.2
21600	147	935.1	947.5	893.4	937.6	990.4	970.4	962.3	971.2
86400	294	941.5	953.3	897.2	942.0	993.0	971.9	964.4	972.5
172800	416	947.8	959.5	902.6	946.3	996.6	974.2	966.6	974.5
259200	509	948.9	961.4	905.2	949.2	998.4	975.3	967.6	975.2
345600	588	949.7	962.0	906.7	950.7	999.5	975.6	968.1	975.9
432000	657	949.9	962.7	908.5	951.0	1001.1	976.8	969.2	977.0
518400	720	950.0	962.9	909.0	951.3	1001.2	976.9	969.3	977.3
691200	831	950.4	963.2	909.6	952.7	1001.9	976.9	969.4	977.4

**Tabla 41. Incremento ( ) de peso por absorción de agua acumulado a través del tiempo**

Tiempo (S)	Tiempo (S <sub>1/2</sub> )	Masa (g)							
		3000 (PSi)/21(MPa)		6000 (PSi)/42(MPa)		7000 (PSi)/49(MPa)		8000 (PSi)/56(MPa)	
		2428-1	2428-2	2427-1	2427-2	2424-1	2424-2	2423-1	2423-2
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	8	1.60	1.70	1.40	1.30	0.70	0.60	0.50	0.50
300	17	3.70	3.70	3.00	2.70	1.70	1.20	1.40	0.50
600	24	5.80	6.20	4.70	4.50	2.80	1.50	2.30	1.40
1200	35	8.50	9.00	6.90	6.50	4.60	3.00	3.40	2.20
1800	42	12.30	12.10	9.00	9.20	6.40	4.30	4.60	3.00
3600	60	14.20	14.20	10.00	11.10	7.40	5.40	5.30	3.40
7200	85	16.80	16.70	11.70	12.10	8.50	5.70	6.00	3.90
10800	104	25.90	24.90	16.80	18.70	12.50	8.30	9.10	6.20
14400	120	27.70	27.00	18.10	20.70	13.80	9.00	9.90	7.00
18000	134	29.30	28.40	19.20	21.30	14.40	9.40	9.60	7.20
21600	147	29.80	29.00	19.40	21.90	14.50	9.50	9.70	7.20
86400	294	36.20	34.80	23.20	26.30	17.10	11.00	11.80	8.50
172800	416	42.50	41.00	28.60	30.60	20.70	13.30	14.00	10.50
259200	509	43.60	42.90	31.20	33.50	22.50	14.40	15.00	11.20
345600	588	44.40	43.50	32.70	35.00	23.60	14.70	15.50	11.90
432000	657	44.60	44.20	34.50	35.30	25.20	15.90	16.60	13.00
518400	720	44.70	44.40	35.00	35.60	25.30	16.00	16.70	13.30
691200	831	45.10	44.70	35.60	37.00	26.00	16.00	16.80	13.40

*Análisis de resultados:* Tabla 41

En la ecuación (7-2) se observa que el cambio en la masa de los especímenes es directamente proporcional a la absorción. Las mezclas con menor resistencia obtuvieron mayor incremento de masa al finalizar el ensayo; incrementos de masa de 45.10, 37.00, 26.00 y 16.80 gramos, para las mezclas de 21, 42, 49 y 56 MPa, respectivamente.

**Tabla 42. Cálculo de la Absorción de agua**

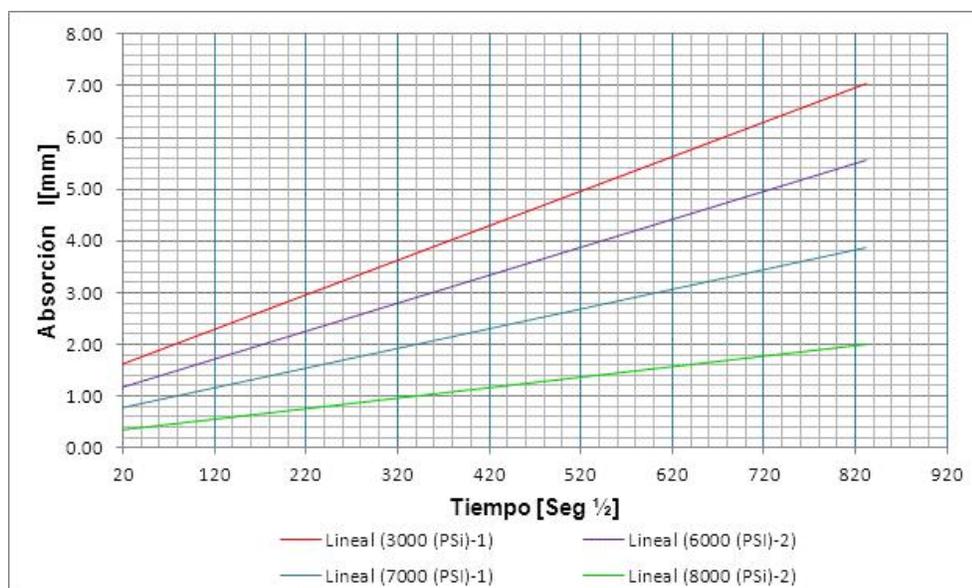
Tiempo (S)	Tiempo (S <sup>1/2</sup> )	Absorción I (mm)							
		3000 (PSi)/21(MPa)		6000 (PSi)/42(MPa)		7000 (PSi)/49(MPa)		8000 (PSi)/56(MPa)	
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	8	0.20	0.22	0.18	0.16	0.09	0.08	0.06	0.06
300	17	0.47	0.47	0.38	0.34	0.22	0.15	0.18	0.06
600	24	0.73	0.78	0.60	0.57	0.36	0.19	0.29	0.18
1200	35	1.07	1.14	0.87	0.82	0.58	0.38	0.43	0.28
1800	42	1.55	1.53	1.14	1.17	0.81	0.54	0.58	0.38
3600	60	1.79	1.80	1.27	1.41	0.94	0.68	0.67	0.43
7200	85	2.12	2.11	1.48	1.53	1.08	0.72	0.76	0.49
10800	104	3.27	3.15	2.13	2.37	1.59	1.05	1.15	0.78
14400	120	3.50	3.42	2.29	2.63	1.75	1.14	1.25	0.89
18000	134	3.70	3.59	2.43	2.70	1.83	1.19	1.22	0.91
21600	147	3.76	3.67	2.46	2.78	1.84	1.20	1.23	0.91
86400	294	4.57	4.40	2.94	3.34	2.17	1.39	1.50	1.08
172800	416	5.37	5.19	3.62	3.88	2.63	1.68	1.77	1.33
259200	509	5.51	5.43	3.95	4.25	2.86	1.82	1.90	1.42
345600	588	5.61	5.50	4.14	4.44	3.00	1.86	1.96	1.51
432000	657	5.63	5.59	4.37	4.48	3.20	2.01	2.10	1.64
518400	720	5.65	5.62	4.44	4.52	3.22	2.02	2.12	1.68
691200	831	5.70	5.65	4.51	4.69	3.31	2.02	2.13	1.70

*Análisis de resultados: Tabla 42*

Por medio de la Tabla 42 se puede observar la velocidad de absorción (mm/s) de las mezclas ensayadas. Velocidades de 5.70, 4.69, 3.31 y 2.13 mm/s, para mezclas de 21, 42, 49 y 56 MPa, respectivamente. Esto permite interpretar la velocidad con que las mezclas pueden absorber sustancias adversas. En otras palabras es 2.68, 2.20, 1.55 veces más rápida la absorción de sustancias al concreto en mezcla de 21, 42 y 49 MPa, con respecto a la mezcla de 56 MPa.

La velocidad descrita para cada una de las muestras está relacionada con la conectividad de poros y la relación agua material cementante. Esta velocidad se puede reducir con un buen curado.

**Figura 21. Tendencia de absorción para mezclas de 21/42/49/56 MPa**



*Análisis de resultados: Figura 21*

En la Figura 21 se ha graficado la tendencia de los valores obtenidos de absorción  $I$  (mm) vs Tiempo, la pendiente de la gráfica es la velocidad de absorción de las mezclas. La mezcla 56MPa/8000 Y 21MPa/3000PSi son las de menor y mayor absorción respectivamente. En este caso la mezcla más vulnerable al ataque de agentes físico-químicos es la mezcla de 21 MPa.

La grafica define el desempeño de cada una de las mezclas e incentiva al uso de concretos más durables con menor deterioro en la superficie y el interior de las estructuras de concreto. El curado homogéneo del concreto puede garantizar que mezclas con baja relación agua material cementante estén acompañadas de cualidades de resistencia y desempeño de baja absorción.

## 7.2.2 Permeabilidad

Permeabilidad indica la posibilidad de acceso de determinadas sustancias físico-químicas a través de los poros y fisuras. Las sustancias que comúnmente entran en contacto con el concreto suelen ser:

- Gases: aire, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, y vapor de agua.
- Fluidos: fundamentalmente el agua
- Sustancias solubles en agua: cloruros, sulfatos, sulfuros, etc.

El acceso de los diferentes agentes puede producirse por convección, difusión succión capilar, pero principalmente a través de sus poros y fisuras superficiales. El volumen de poros capilares están en función de la relación agua/ material cementante incorporada en su fabricación. En consecuencia, al igual que la resistencia, la permeabilidad de un hormigón está íntimamente relacionada con su porosidad.

La permeabilidad del concreto está en función de la permeabilidad del material cementante, del agregado, de la proporción relativa del material cementante y el agregado, de la relación agua/Material cementante, poros interconectados y el curado.

Para producir concretos de baja permeabilidad se requiere de un relación agua/Material cementante baja y un periodo de curado idóneo. El control de permeabilidad de una mezcla permitirá mejorar la resistencia del concreto al ataque de sulfatos, penetración del ion cloruros y otros productos químicos.

A continuación se presenta uno de los ensayos de permeabilidad del concreto al agua, procedimientos realizados con las normas NTC-4483 y ASTM C642, Véase (Fotografía 30). Con el ensayo se busca determinar las profundidades de penetración y el coeficiente de permeabilidad de las mezclas de 42, 49, 56 MPa y comparar la caracterización con respecto a la mezcla de uso común de 21 MPa.

**Fotografía 30. Montaje para la obtención de la permeabilidad**

El ensayo de permeabilidad, permite conocer la cantidad de migración de agua a través de los poros del concreto cuando el agua se encuentra a presión, determinando una medida de la capacidad del concreto a resistir la penetración del agua. Para el ensayo de estos especímenes se elaboraron y curaron de acuerdo con la NTC 1377 (ASTM -C192).

Para determinar la profundidad de penetración, una vez cumplidos 4 días aplicando sobre una de sus caras horizontales una presión de 0.5 MPa, sin haber registrado flujo constante, se secciona el espécimen perpendicularmente a la cara sobre la cual se aplicó la presión de agua (ensayo de tracción indirecta según ASTM- C496), Véase (Fotografía 31), y se mide la profundidad promedio de penetración. A continuación se presenta los datos obtenidos por cara y por tipo de mezcla.

Fotografía 31. Ensayo de tracción indirecta según ASTM- C496



Tabla 43. Profundidad de permeabilidad 21 MPa

Fotografía 32. Profundidad de permeabilidad 21 MPa

Profundidad de Permeabilidad (mm)			
Mezcla 3000 PSi (21 MPa)			
2428-1		2428-2	
Cara		Cara	
A	B	A	B
42.33	48.05	33.72	30.54
47.69	49.03	23.62	34.80
45.27	35.80	41.93	25.84
56.15	32.57	23.38	45.00
38.11	49.48	45.51	31.17
57.45	30.90	41.88	45.99
34.10	57.62	42.32	44.64
Promedio por cara			
45.87	43.35	36.05	36.85



**Tabla 44. Profundidad de permeabilidad 42 MPa**

**Fotografía 33. Profundidad de permeabilidad 42 MPa**

Profundidad de Permeabilidad (mm)			
Mezcla 6000 PSi (42 MPa)			
2427-1		2427-2	
Cara		Cara	
A	B	A	B
33.77	32.44	28.48	31.80
26.52	30.47	22.26	24.76
35.68	29.84	21.60	32.85
26.46	28.76	27.85	19.99
33.25	29.66	21.92	34.57
26.18	28.19	28.42	20.41
28.49	26.06	23.56	25.98
Promedio por cara			
30.05	29.35	24.87	27.19



**Tabla 45. Profundidad de permeabilidad 49 MPa**

**Fotografía 34. Profundidad de permeabilidad 49 MPa**

Profundidad de Permeabilidad (mm)			
Mezcla 7000 PSi (49 MPa)			
2424-1		2424-2	
Cara		Cara	
A	B	A	B
18.49	16.49	11.70	12.45
18.24	9.59	12.34	10.27
14.07	21.54	15.91	9.65
16.92	10.13	8.87	11.62
14.05	22.22	12.73	11.50
18.15	8.77	17.57	9.41
10.84	20.23	11.65	19.92
Promedio por cara			
15.82	15.57	12.97	12.12



**Tabla 46. Resultados de Profundidad de permeabilidad 56 MPa**

**Fotografía 35. Profundidad de permeabilidad 56 MPa**

Profundidad de Permeabilidad (mm)			
Mezcla 8000 PSi (56 MPa)			
2423-1		2423-2	
Cara		Cara	
A	B	A	B
11.25	12.01	11.80	11.74
8.62	14.40	7.68	10.54
12.92	10.66	10.06	10.51
9.14	9.30	7.86	8.17
16.71	7.68	8.90	10.51
15.44	12.49	9.50	8.16
16.34	19.33	6.00	8.50
Promedio por cara			
12.92	12.27	8.83	9.73



En la Tabla 47 se presenta un resumen de la máxima profundidad de permeabilidad vs la resistencia y su respectiva relación de contenido de agua/material cementante. *Análisis de resultados:* Tabla 47

En la Tabla 47 se observa que la profundidad de permeabilidad es directamente proporcional a la relación agua/material cementante, e inversamente proporcional a la resistencia. La razón de profundidad de permeabilidad de la mezcla 21, 42 y 49 MPa es del orden de 3.55, 2.33, 1.22 veces más profunda, con respecto a la mezcla de 56 MPa. El uso de concretos de más alto desempeño permitirá proteger el refuerzo y evitar la corrosión y deterioro de la estructura.

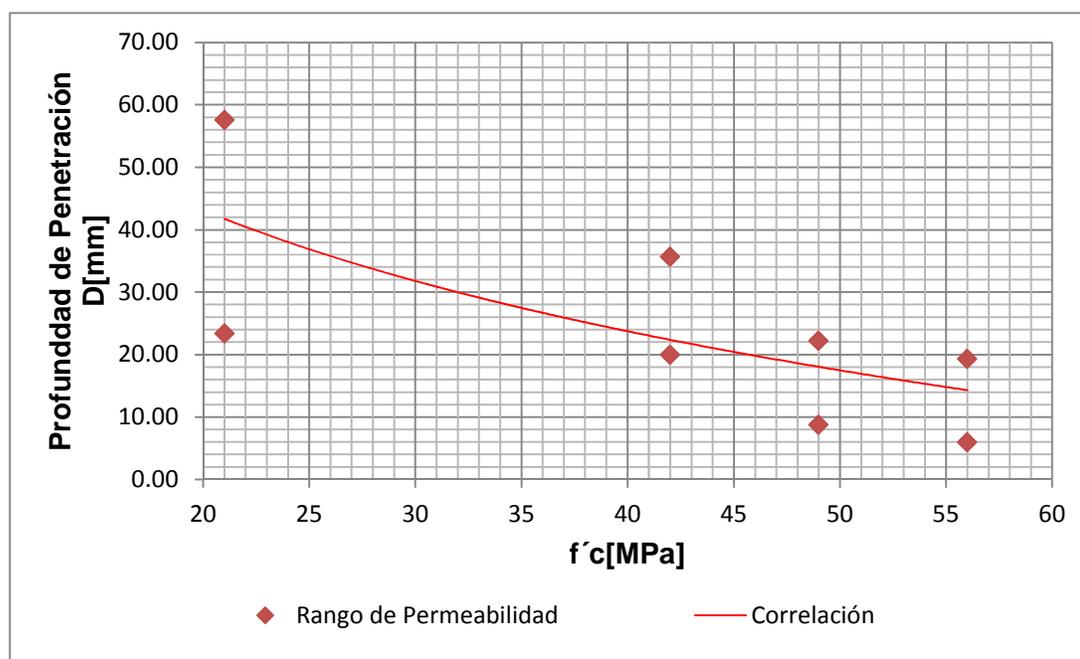
**Tabla 47. Resumen de la permeabilidad del concreto**

Resumen de Permeabilidad				
Muestra	A/C	MPa	PSI	Profundidad [mm]
2428	0.67	21	3000	45.87
2427	0.43	42	6000	30.05
2424	0.38	49	7000	15.82
2423	0.33	56	8000	12.92

### Análisis de resultados: Tabla 47

En la Tabla 47 se observa que la profundidad de permeabilidad es directamente proporcional a la relación agua/ material cementante, e inversamente proporcional a la resistencia. La razón de profundidad de permeabilidad de la mezcla 21, 42 y 49 MPa es del orden de 3.55, 2.33, 1.22 veces más profunda, con respecto a la mezcla de 56 MPa. El uso de concretos de más alto desempeño permitirá proteger el refuerzo y evitar la corrosión y deterioro de la estructura.

**Figura 22. Permeabilidad del concreto vs  $f'c$  [MPa]**



### Análisis de resultados: Figura 22

En la Figura 22 se observa con mayor claridad lo analizado en la Tabla 47, El rango de valores de profundidad de permeabilidad es de 23.38 a 57.62mm, de 19.99 a 35.68mm, de 8.77 a 22.22mm, de 6.00 a 19.33 mm, para las mezcla de 21, 42, 49 y 56 MPa respectivamente. Podemos concluir que a medida que aumenta la resistencia esta va acompañada de cualidades de reducción de rango de máximos y mínimos de profundidad de permeabilidad. La reducción de la profundidad de permeabilidad tiene una tendencia exponencial.

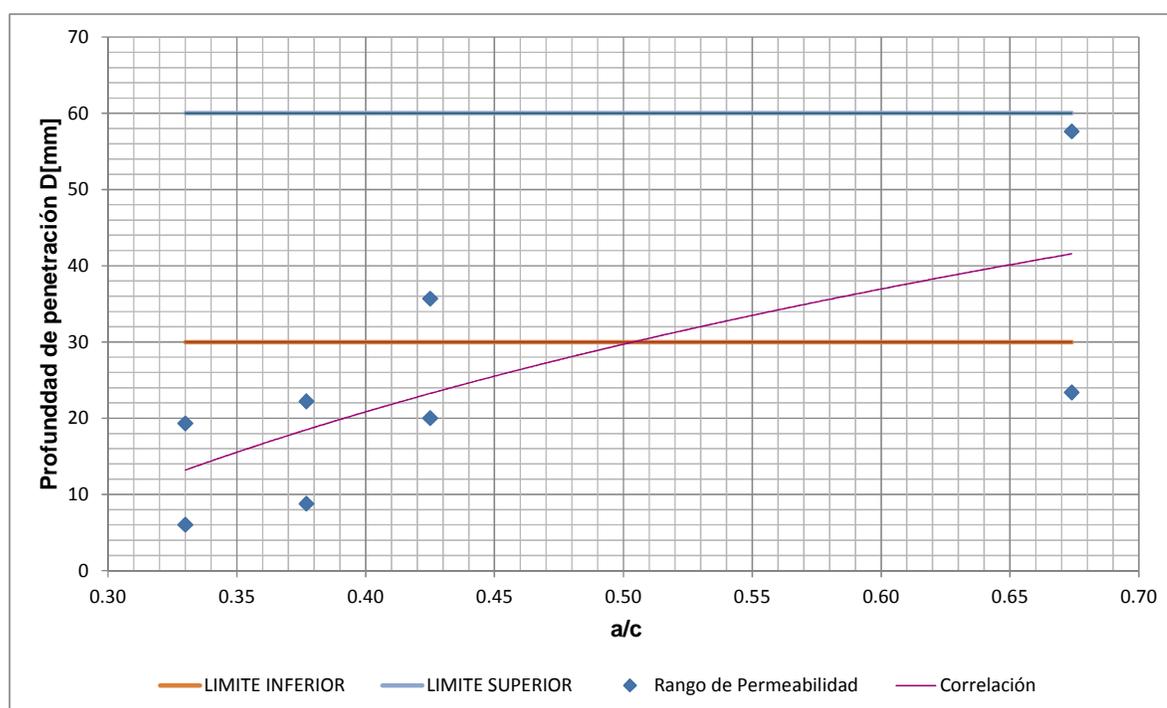
La Tabla 48 muestra la relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración. Estos valores resultan útiles como guía para determinar si se posee un alta, media o baja permeabilidad.

**Tabla 48. Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración**

DETERMINACIÓN	UNIDADES	PERMEABILIDAD		
		BAJA	MEDIA	ALTA
Coeficiente de permeabilidad al agua	m/s	$<10^{-12}$	$10^{-12}$ a $10^{-10}$	$>10^{-10}$
Profundidad de penetración	mm	$<30$	30 a 60	$>60$

Fuentes (NTC-4483, 1998)

**Figura 23. Permeabilidad del concreto vs relación material cementante a/c**



*Análisis de resultados:* Figura 23

En la Figura 23 se destacan dos límites aportados por la norma NTC 4483, véase (Tabla 48), que permiten clasificar a estos concretos entre baja, media y alta permeabilidad. Las mezclas de 21 y 42 MPa se encuentran en un rango de permeabilidad media. Las mezclas de 49 y 56 MPa, se encuentran en un rango de permeabilidad bajo. Las bajas relaciones de agua material cementante obtienen permeabilidades bajas del concreto.

Una vez determinado la profundidad promedio de penetración se deduce el coeficiente de permeabilidad, véase ecuación (7-3) de la Norma NTC 4483:

$$k = \frac{D^2 v}{2Th} \quad (7-3)$$

Donde:

K= coeficiente de permeabilidad en m/s

D = profundidad de penetración en m

T = tiempo para penetrar la profundidad D en s

h = cabeza de presión en m

v= porosidad del concreto en ensayo determinada mediante la norma ASTM C-642

A continuación se presentan las Tabla 49, Tabla 50, Tabla 51 y Tabla 52 en las cuales se obtienen los coeficientes de permeabilidad para los diferentes tipos de mezclas de 21, 42, 49, 56 MPa respectivamente.

**Tabla 49. Obtención del Coeficiente de Permeabilidad para 21 MPa**

<b>Coeficiente de Permeabilidad K</b>		
<b>Mezcla 3000 PSi (21 MPa)</b>		
<b>Tipo de Peso</b>	<b>2428-1</b>	<b>2428-2</b>
<b>D(mm)</b>	45.87	36.85
<b>T(s)</b>	345600	345600
<b>h(mm)</b>	50000	50000
<b>v</b>	<b>0.10</b>	<b>0.09</b>
<b>k (m/s)</b>	6.18E-12	3.58E-12

**Tabla 50. Obtención del Coeficiente de Permeabilidad para 42 MPa**

<b>Coeficiente de Permeabilidad K</b>		
<b>Mezcla 6000 PSi (42 MPa)</b>		
<b>Tipo de Peso</b>	<b>2427-1</b>	<b>2427-2</b>
<b>D(mm)</b>	30.05	27.19
<b>T(s)</b>	345600	345600
<b>h(mm)</b>	50000	50000
<b>v</b>	<b>0.13</b>	<b>0.08</b>
<b>k (m/s)</b>	3.47E-12	1.80E-12

**Tabla 51. Obtención del Coeficiente de Permeabilidad para 49 MPa**

<b>Coeficiente de Permeabilidad K</b>		
<b>Mezcla 7000 PSi (49 MPa)</b>		
<b>Tipo de Peso</b>	<b>2424-1</b>	<b>2424-2</b>
<b>D(mm)</b>	15.82	12.97
<b>T(s)</b>	345600	345600
<b>h(mm)</b>	50000	50000
<b>v</b>	<b>0.08</b>	<b>0.07</b>
<b>k (m/s)</b>	5.66E-13	3.54E-13

**Tabla 52. Obtención del Coeficiente de Permeabilidad para 56 MPa**

<b>Coeficiente de Permeabilidad K</b>		
<b>Mezcla 8000 PSi (56 MPa)</b>		
<b>Tipo de Peso</b>	<b>2423-1</b>	<b>2423-2</b>
<b>D(mm)</b>	12.92	9.73
<b>T(s)</b>	345600	345600
<b>h(mm)</b>	50000	50000
<b>v</b>	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>
<b>k (m/s)</b>	3.28E-13	1.54E-13

La Tabla 53 muestra un resumen de la relación de coeficientes de permeabilidad del concreto vs la resistencia y su respectiva razón de contenido de agua/ material cementante.

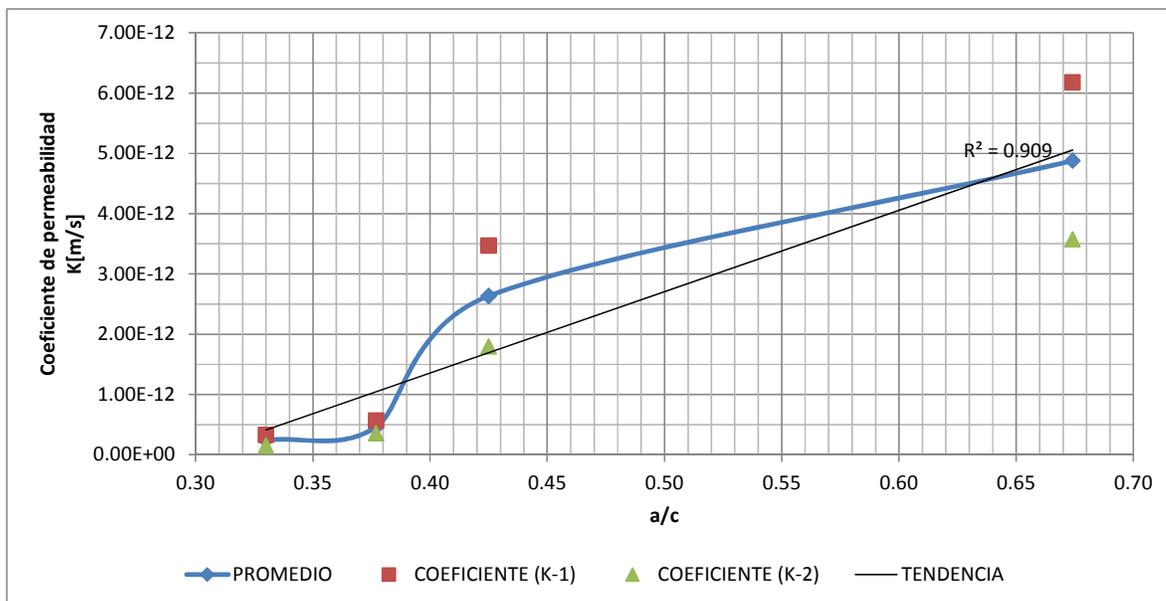
**Tabla 53. Resumen Coeficiente promedio de permeabilidad al agua**

<b>Coeficiente de Permeabilidad</b>				
<b>Muestra</b>	<b>a/c</b>	<b>MPa</b>	<b>PSI</b>	<b>K (m/s) (Promedio)</b>
2428	0.67	21	3000	4.88E-12
2427	0.43	42	6000	2.63E-12
2424	0.38	49	7000	4.60E-13
2423	0.33	56	8000	2.41E-13

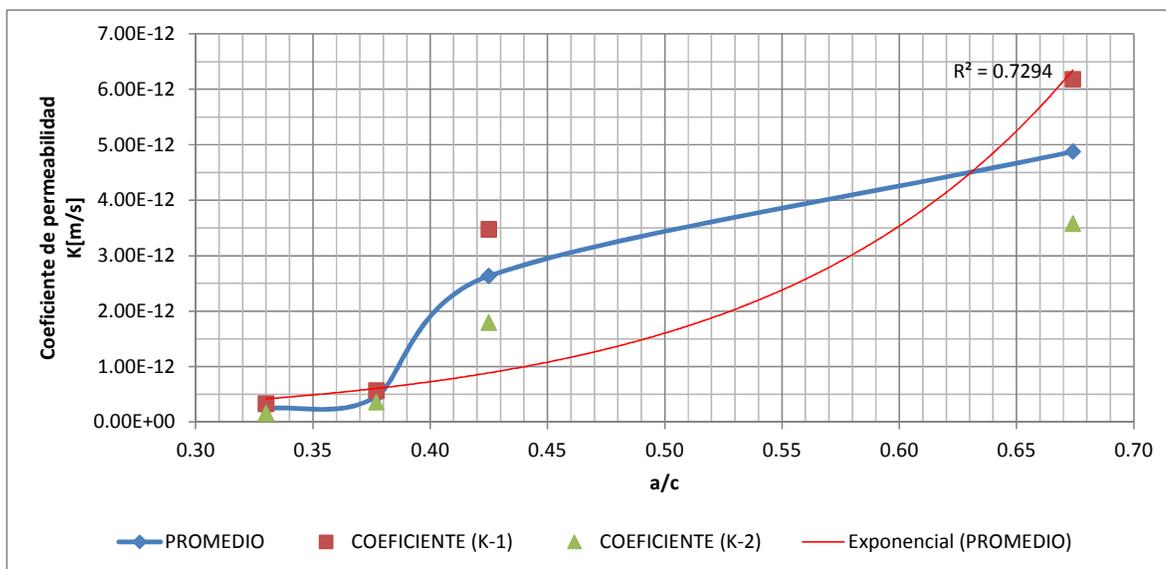
*Análisis de resultados:* Tabla 53

La Tabla 53 resume los coeficientes de permeabilidad al agua obtenidos en el ensayo. Existe una relación directa entre el coeficiente de permeabilidad y el contenido de agua material cementante. Según la Tabla 48, los coeficientes de permeabilidad para las mezclas de 21 y 42 MPa se encuentran en el orden de permeabilidad media y las mezclas de 49 y 56 MPa en el orden de permeabilidad baja.

**Figura 24. Coeficiente de Permeabilidad al agua vs relación material cementante a/c (Tendencia lineal)**



**Figura 25. Coeficiente de Permeabilidad al agua vs relación material cementante a/c (Tendencia exponencial)**



---

*Análisis de resultados:* Figura 24 y Figura 25

En las Figura 24 y Figura 25 se grafican los coeficientes de permeabilidad al agua vs la relación agua material cementante. Se grafican con dos tipos de tendencia para estimar el grado de confiabilidad. La tendencia lineal permite una confiabilidad del 90% y la exponencial alrededor de 73%. El coeficiente de permeabilidad debe ser del orden exponencial por la naturaleza de su ecuación, pero es importante resaltar que es afectada directamente por la porosidad de la mezcla, Véase (Tabla 39), al emplear el valor más desfavorable de porosidad 13.89% para la mezcla de 42 MPa. Esto incidió en su alto coeficiente de permeabilidad, por lo tanto, la permeabilidad está en función directa de la red de capilares del concreto. Por otro lado se observa que a medida que aumenta la relación de agua material cementante, el coeficiente de permeabilidad lo hace de la misma manera.

### **7.2.3 Penetración Ion Cloruro**

La norma ASTM C-1202 estandariza la medición de la permeabilidad de cloruros en forma indirecta mediante la aplicación de carga eléctrica y la correlación de la resistencia eléctrica con coeficientes de permeabilidad. Se utilizó un equipo en el que sigue los requerimientos dados por esta norma. Véase (Fotografía 36).

Los cloruros los encontramos normalmente en ambientes cercanos al mar, en el agua marina, en ciertos suelos y aguas contaminadas de manera natural o artificial. Los cloruros no tienen acción perjudicial directa sobre el concreto, es a través de su mecanismo de corrosión del acero embebido que produce compuestos de hierro que al expandirse rompen la estructura del material cementante y los agregados.

Para evaluar la resistencia a los cloruros en diferentes mezclas de concreto se realizó el ensayo de permeabilidad rápida a cloruros, estipulado en la norma ASTM 1202 y la AASHTO T277. Se ensayaron concretos con 4 diferentes relaciones agua material cementante que corresponden a mezclas de 21, 42, 49 y 56 MPa.

### Fotografía 36. Montaje para la obtención de penetración cloruros



En el procedimiento se revisa la capacidad del concreto para resistir la penetración del ión cloruro mediante una indicación eléctrica de 60 V durante 6 horas. Se determina el área bajo la curva contra el tiempo, la cual representa la carga total o los Coulomb que pasaron a través del espécimen. Se registra esta carga que es transmitida por el sistema, la cual es usada para valorar la permeabilidad del concreto. Véase (Tabla 54).

**Tabla 54. Medición de la penetración de cloruros a 6 horas.**

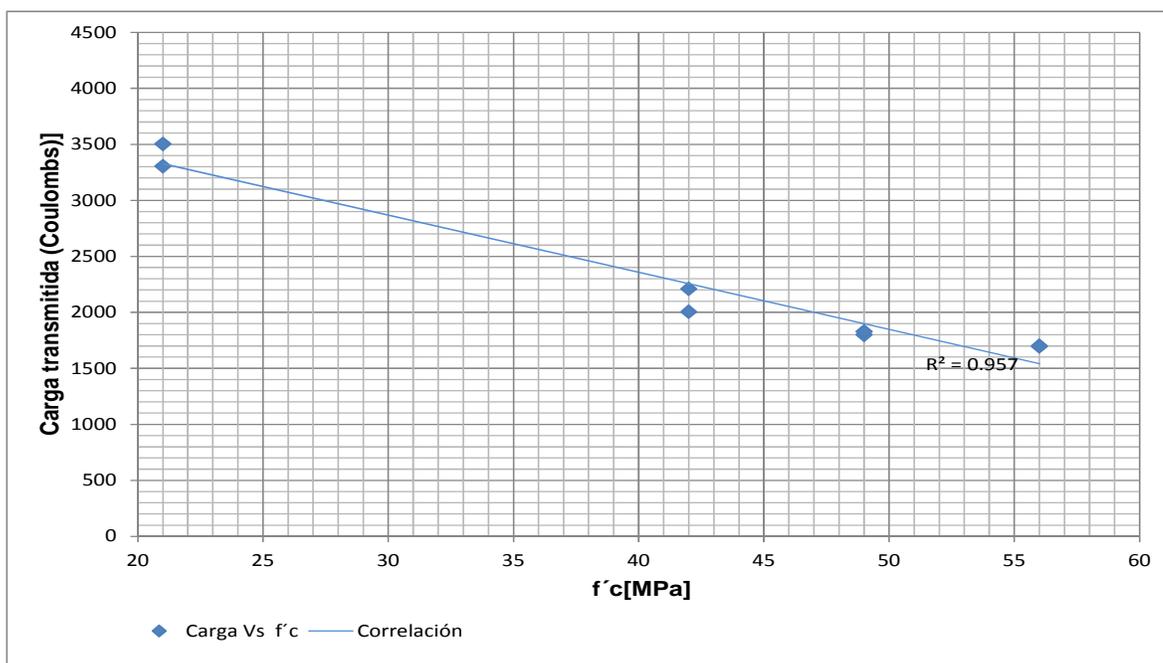
Muestra	a/c	Resistencia Nominal		Carga Eléctrica
		MPa	PSi	Coulomb
2423-A	0.33	56	8000	1695
2423-B	0.33	56	8000	1702
2424-A	0.38	49	7000	1800
2424-B	0.38	49	7000	1830
2427-A	0.43	42	6000	2005
2427-B	0.43	42	6000	2209
2428-A	0.67	21	3000	3504
2428-B	0.67	21	3000	3304

**Tabla 55. Penetración Ion Cloruro basado en el paso de Carga**

<b>Coulombs</b>	<b>Clase de Permeabilidad</b>
>4000	Alta
4000-2000	Moderada
2000-1000	Baja
1000-100	Muy Baja
<100	Insignificante

**Fuentes (ASTM C1202-10, 2010)**

**Figura 26. Penetración Ion Cloruro basado en el paso de Carga vs  $f'c$  [MPa]**

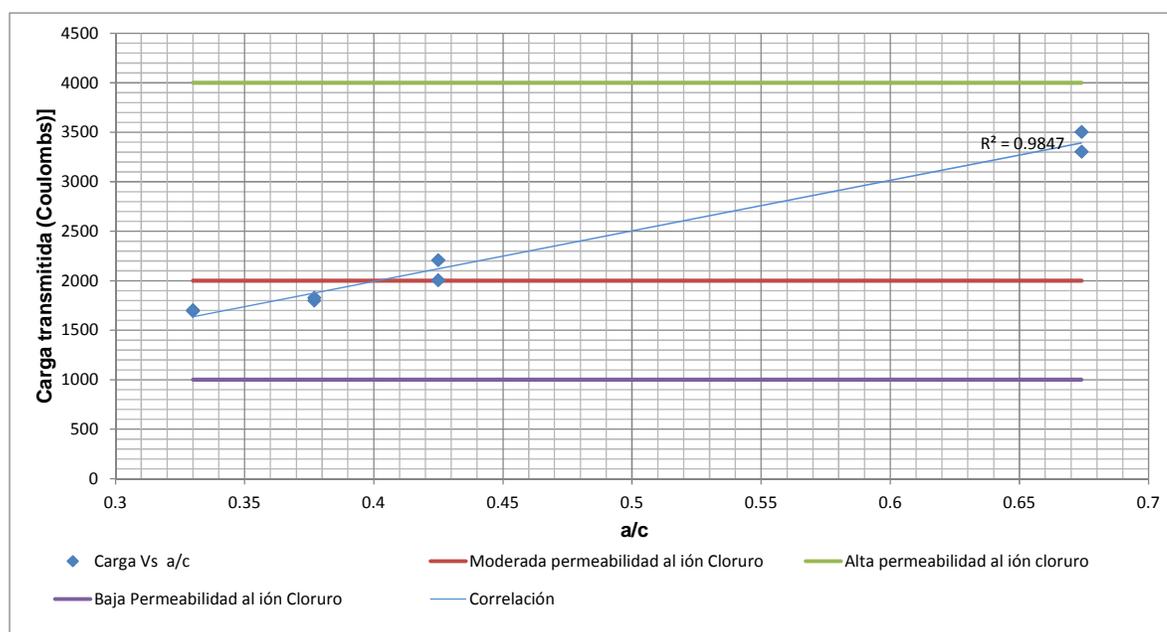


*Análisis de resultados:* Figura 26

La medición de la permeabilidad de cloruros en forma indirecta mediante la aplicación de carga eléctrica es inversamente proporcional a la resistencia de las

mezclas. Su tendencia es lineal con un grado de confiabilidad del orden del 96%. Entre más permeable es el concreto, mas iones cloruro viajaran a través de él espécimen, y una mayor corriente será medida. Esto significa que las mezclas de 21 y 42 MPa fueron más permeables a ion cloruros con 3504 y 2209 Coulomb respectivamente y con una menor permeabilidad las mezclas de 49 y 56 MPa con 1800 y 1695 Coulomb respectivamente.

**Figura 27. Penetración Ion Cloruro basado en el paso de Carga vs Relación Agua material Cementante**



*Análisis de resultados:* Figura 27

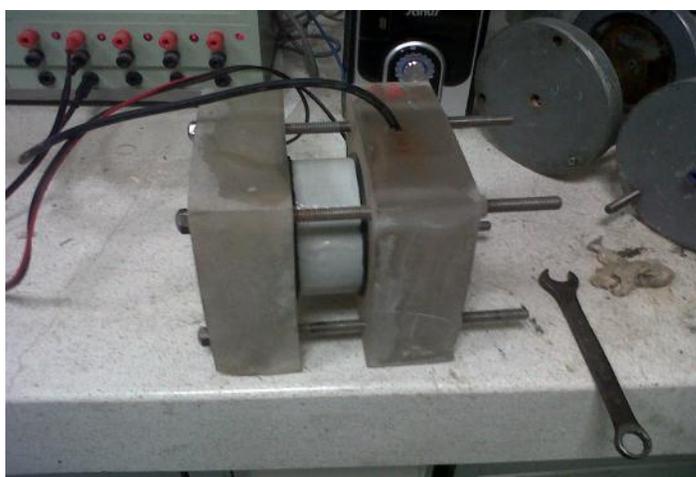
Con base a la clasificación de la norma ASTM-C1202. Véase (Tabla 55). La permeabilidad de las mezclas con mayor relación agua material cementante tienen una moderada permeabilidad al ion cloruro, mezclas de 21 y 42 MPa. Relaciones de agua material cementante menores poseen una permeabilidad baja al ion cloruro, mezclas de 49 y 56 MPa.

#### 7.2.4 Coeficiente de Difusión

La difusión es un proceso donde los iones cloruros son transportados a través de la microestructura del concreto debido a una diferencia de concentración, de una mayor a una menor. El coeficiente de difusión de cloruros permite medir la resistencia del material a la penetración de cloruros. Este parámetro es utilizado para caracterizar a los concretos con los parámetros de durabilidad y predecir su vida útil.

El ensayo de difusión realizado a las mezclas de 21, 42, 49 y 56 MPa consistió en la aplicación de un potencial eléctrico externo, Véase (Fotografía 37), donde las mezclas se encontraban en estado saturado, para obligar a los iones de cloruro a migrar por los capilares del concreto. Después de un cierto período de prueba, las muestras son sometidas a un ensayo de tracción indirecta por medio de la norma ASTM-C496, Véase (Fotografía 31). Se aplica una solución de nitrato de plata sobre uno de las secciones recién divididas. La profundidad de penetración de cloruro se puede medir a partir del cloruro de plata blanca visible. Véase (Fotografía 38, Fotografía 39, Fotografía 40, Fotografía 41).

#### Fotografía 37. Montaje ensayo Coeficiente de Difusión



Se procede a medir la profundidad de penetración, desde el centro de la muestra hacia ambos bordes a intervalos de 10 mm, para obtener siete medidas. Véase (Tabla 56, Tabla 57, Tabla 58, Tabla 59).

**Tabla 56. Profundidad de penetración de cloruro mezcla 21 MPa**

**Fotografía 38. Profundidad de penetración de cloruro mezcla 21 MPa**

<b>Coeficiente de Difusión</b>	
<b>2428/21MPa/3000PSi</b>	
<b>Profundidad (mm)</b>	
<b>A</b>	<b>B</b>
9.30	19.95
22.30	19.38
19.96	15.94
9.36	17.57
28.37	14.80
18.60	15.54
16.23	14.82
Promedio por cara	
<b>17.73</b>	<b>16.86</b>



**Tabla 57. Profundidad de penetración de cloruro mezcla 42 MPa**

**Fotografía 39. Profundidad de penetración de cloruro mezcla 42 MPa**

<b>Coeficiente de Difusión</b>	
<b>2427/42MPa/6000PSi</b>	
<b>Profundidad (mm)</b>	
<b>A</b>	<b>B</b>
15.65	10.81
10.42	11.25
11.21	12.26
6.64	10.91
7.56	12.60
11.00	12.51
7.82	11.32
Promedio por cara	
<b>10.04</b>	<b>11.67</b>



**Tabla 58. Profundidad de penetración de cloruro mezcla 49 MPa**

**Fotografía 40. Profundidad de penetración de cloruro mezcla 49 MPa**

<b>Coeficiente de Difusión</b>	
<b>2424/49MPa/7000PSi</b>	
<b>Profundidad (mm)</b>	
<b>A</b>	<b>B</b>
5.82	4.99
2.63	8.16
7.14	6.24
2.92	6.96
7.46	3.10
2.96	4.43
4.40	5.66
Promedio por cara	
<b>4.76</b>	<b>5.65</b>



**Tabla 59. Profundidad de penetración de cloruro mezcla 56 MPa**

**Fotografía 41. Profundidad de penetración de cloruro mezcla 56 MPa**

<b>Coeficiente de Difusión</b>	
<b>2423/56MPa/8000PSi</b>	
<b>Profundidad (mm)</b>	
<b>A</b>	<b>B</b>
4.10	4.88
3.87	3.01
3.47	3.50
2.77	3.14
6.06	3.66
5.72	4.20
4.15	3.20
Promedio por cara	
<b>4.31</b>	<b>3.66</b>



En la Tabla 60 se resume la medición de la profundidad máxima de permeabilidad a cloruros de las mezclas 21, 42, 49 Y 56 MPa.

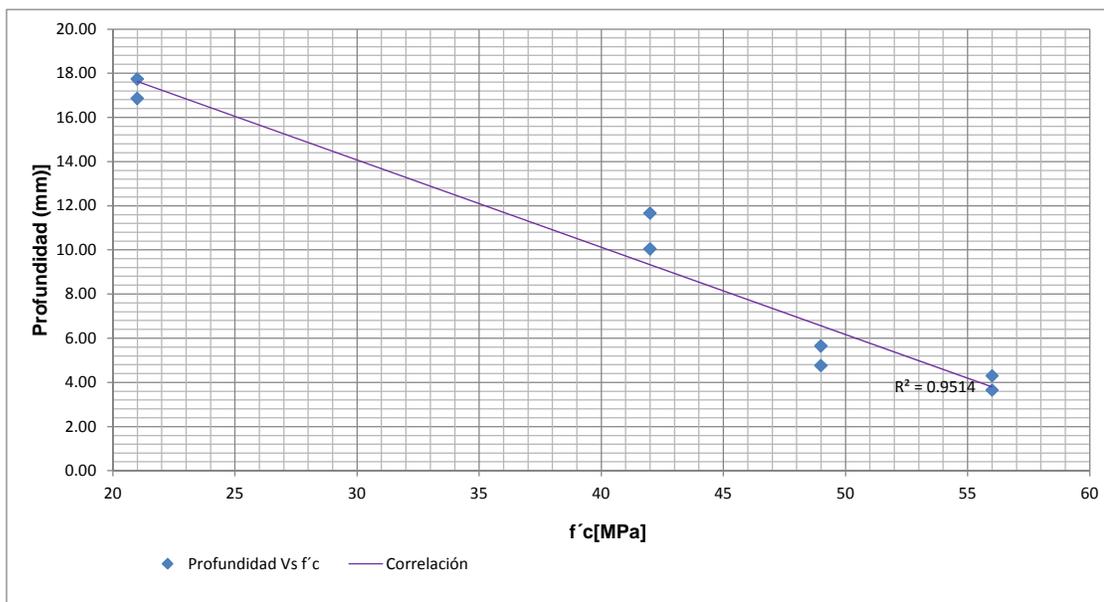
**Tabla 60. Resumen medición de la penetración de cloruros a 24 horas con revelador.**

Resumen de Profundidad máxima				
Muestra	a/c	MPa	PSI	Profundidad [mm]
2428	0.67	21	3000	17.73
2427	0.43	42	6000	11.67
2424	0.38	49	7000	5.65
2423	0.33	56	8000	4.31

*Análisis de resultados:* Tabla 60

La profundidad de penetración de cloruros máxima registrada por cada una de las mezclas es a razón de 4.11, 2.71, y 1.31 veces más profunda, para mezclas de 21,42 y 49 MPa respectivamente, con base a la mezcla de 56 MPa. La profundidad de penetración es directamente proporcional a la relación agua material cementante e inversamente proporcional a su resistencia.

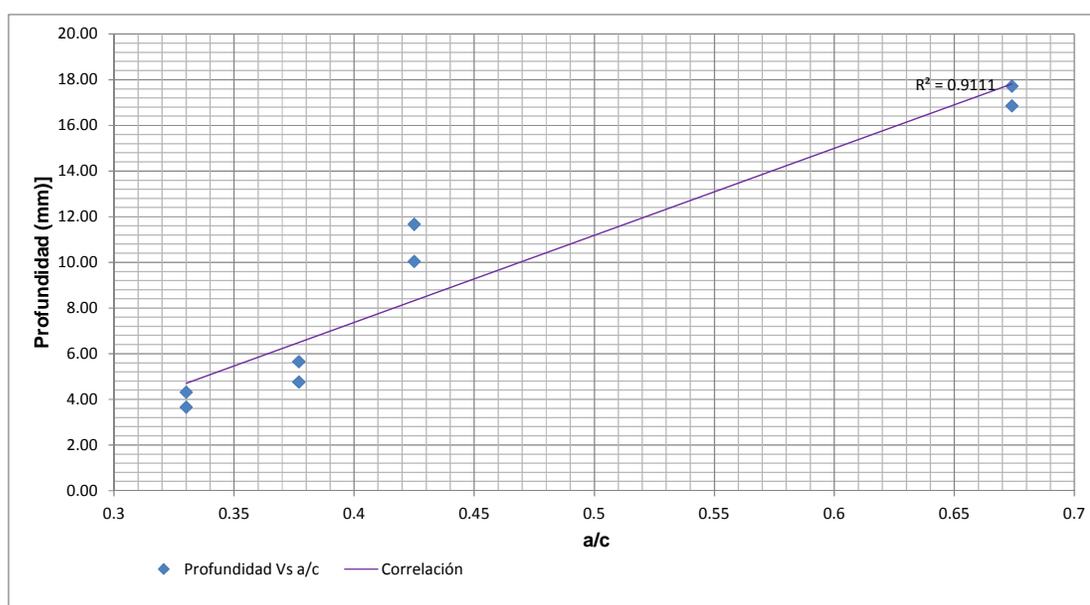
**Figura 28. Profundidad detectada por colorimetría vs  $f'c$  [MPa]**



*Análisis de resultados:* Figura 28

La profundidad detectada por colorimetría refleja una tendencia lineal con respecto a la resistencia de las mezclas con un grado de confiabilidad del 95%. Al tratarse de un ensayo acelerado de migración de ion cloruro, la mezcla con menor resistencia alcanzan profundidades de permeabilidad cercanas a la mitad de su espesor de ensayo (50mm). Las mezclas de menor resistencia poseen una microestructura capilar más porosa que permite la migración o movimiento del ion cloruro.

**Figura 29. Profundidad detectada por colorimetría vs agua material cementante**



#### *Análisis de resultados: Figura 29*

La relación agua material cementante permite controlar la cantidad e interconexión de poros dentro de las mezclas. El ensayo refleja que a bajas relaciones agua material cementante controla la cantidad e interconexión de poros reduciendo la migración y manteniéndolo superficialmente. La mezcla de 56 MPa registra una penetración de menos de una décima parte de su espesor de ensayo (50mm).

Las profundidades de penetración de ion cloruro no se pueden comparar directamente con los coeficientes de difusión por lo que requiere la aplicación de la ecuación simplificada de la norma NT BUILD 492. (7-4).

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left( xd - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)L * xd}{(U-2)}} \right) \quad (7-4)$$

Donde:

$D_{nssm}$ = Coeficiente de migración de estado no estacionario  $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s

U= Valor absoluto del voltaje aplicado, V;

T= Temperatura promedio, °C;

L= Espesor de los especímenes, mm;

Xd= Valor promedio de la profundidad de penetración, mm;

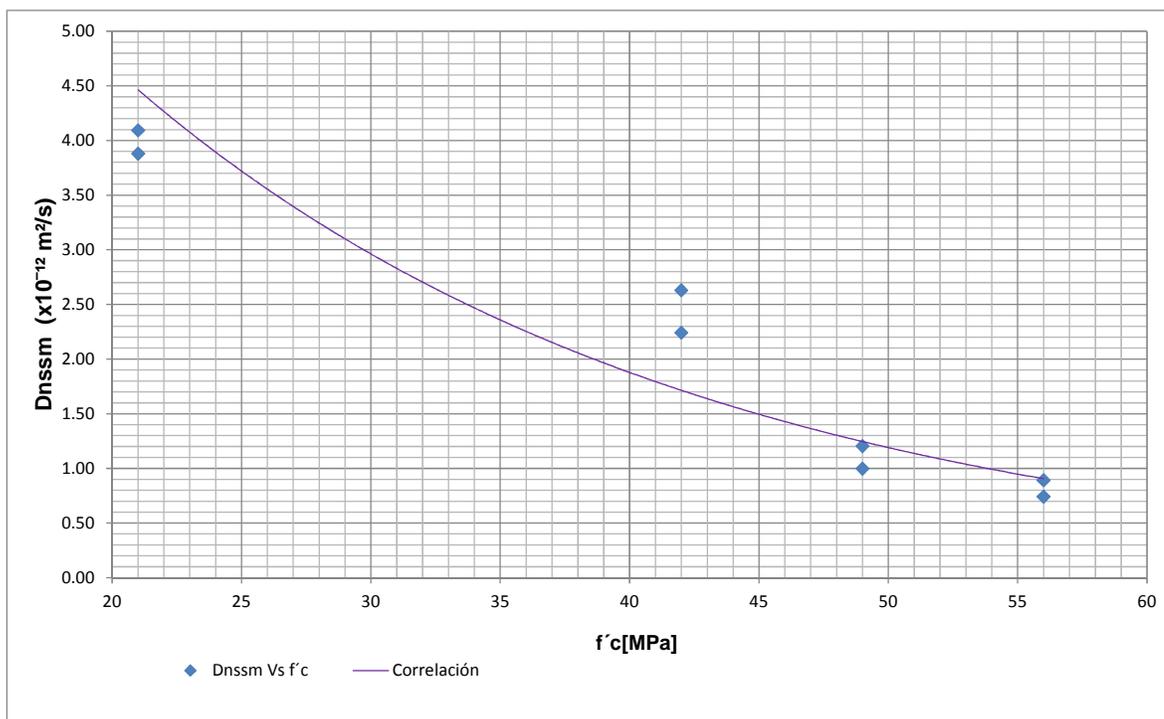
Los resultados obtenidos con la ecuación (7-4) se registran en la Tabla 61, para la mezclas de 21, 42, 49 y 56 MPa.

**Tabla 61. Coeficientes de difusión de ion cloruro del concreto**

Coeficiente de Difusión					
Muestra	a/c	MPa	PSI	Dnssm ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	
				Cara A	Cara B
2428	0.67	21	3000	4.09	3.88
2427	0.43	42	6000	2.24	2.63
2424	0.38	49	7000	1.00	1.20
2423	0.33	56	8000	0.89	0.74

*Análisis de resultados:* Tabla 61

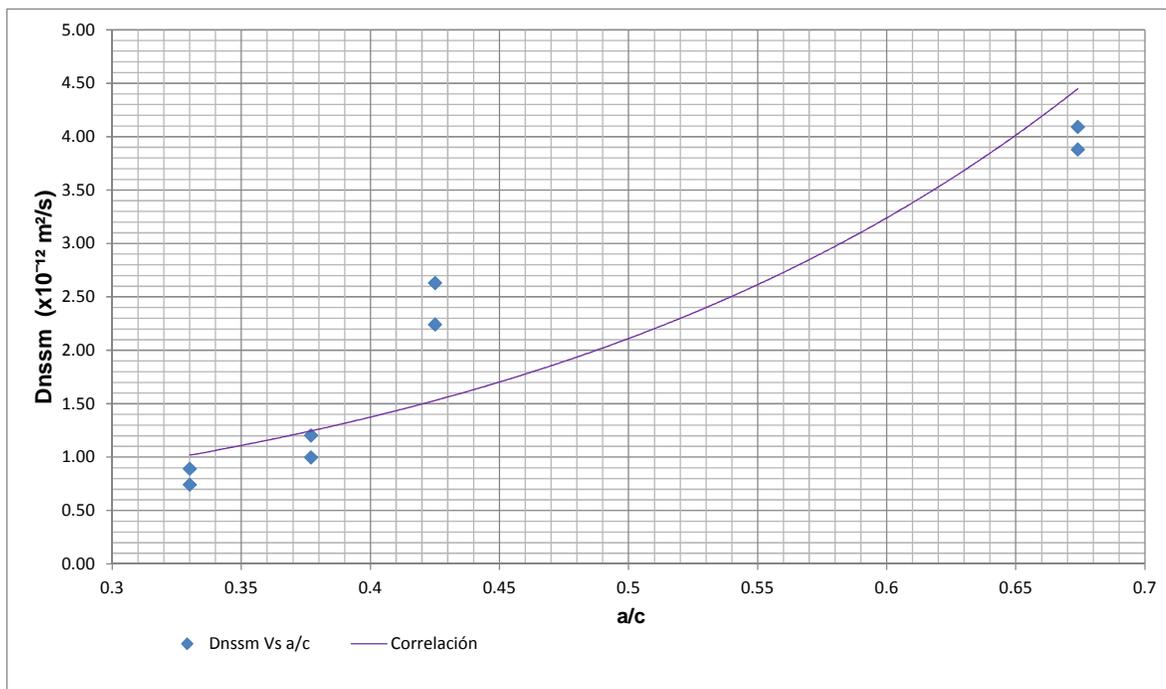
El coeficiente de difusión permite determinar como la concentración de cloruros cambia a diferentes profundidades en el tiempo, en otras palabras, define la velocidad de penetración de cloruros a través de los poros del concreto. La mezcla de 21 MPa es susceptible a un deterioro rápido por la velocidad de penetración de cloruros, caso contrario, la mezcla de 56 MPa será más durable.

**Figura 30. Coeficientes de difusión de ion cloruro del concreto vs  $f'c$  [MPa]**

*Análisis de resultados:* Figura 30

El coeficiente de difusión decrece a medida que aumenta la resistencia de las mezclas. Las dosificaciones de las muestras tienen propiedades que permiten que la velocidad de penetración del cloruro se reduzca o incremente exponencialmente.

**Figura 31. Coeficientes de difusión de ion cloruro del concreto vs agua material cementante**



*Análisis de resultados:* Figura 31

La velocidad de penetración de cloruros se incrementa exponencialmente a medida que se aumenta la relación agua material cementante, ligado a la cantidad e interconexión de poros presentes en la difusión de cloruros, los cuales afectan directamente la durabilidad del concreto. La mezcla de 21 MPa posee la más alta velocidad de permeabilidad a cloruros y empieza a decrecer significativamente en las mezclas de 49 y 56 MPa.

### 7.2.5 Resistencia a la Carbonatación del Concreto

La carbonatación es un proceso que ocurre todos los días en todo tipo de estructuras. El concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es un proceso de pocas consecuencias, por otro lado, el concreto reforzado se desarrolla un proceso químico, el cual avanza lenta y progresivamente desde la cara expuesta del concreto, hasta la profundidad del acero de refuerzo generando su corrosión.

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH y se desarrolla cuando el dióxido de carbono de la atmósfera reacciona químicamente con la humedad a través de los micro poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio (con alto pH) a carbonato de calcio, el cual tiene un pH más neutral.

El concreto, protege al acero de refuerzo contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero. Cuando la carbonatación alcanza la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora deja de ser estable y es posible que empiece la corrosión, presentándose las fisuras y posteriormente la grietas sobre el concreto.

La carbonatación depende, en gran medida, del contenido de humedad y de la permeabilidad del concreto. La carbonatación avanza más rápidamente cuando la humedad relativa en el concreto se encuentra entre el 50 y el 60 por ciento. Por lo tanto la carbonatación se evita al producir concretos de baja permeabilidad con bajas relaciones de agua/ material cementante, buena compactación, uso de puzolanas como cenizas volantes o humo de sílice, y un riguroso curado.

La difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto puede tomar varios años antes de que se detecte la corrosión en el refuerzo, donde se puede generar el colapso instantáneo o deterioro avanzado difícil de reparar.

La Tabla 62 muestra la correlación de la cámara de carbonatación con una humedad relativa del 65%, en la cual se realiza dos mediciones de especímenes expuestos a la concentración de  $\text{CO}_2$  en un tiempo de exposición de 30 y 60 días. Véase (Fotografía 42).

### Fotografía 42. Cámara de carbonatación



**Tabla 62. Correlación Cámara de carbonatación.**

<b>Correlación Cámara de Carbonatación</b>	
Humedad relativa [%HR].	65
Concentración de [%CO <sub>2</sub> ]	4
Temperatura [°C]	25
Tiempo-1 [días]	30
Tiempo-2 [días]	60

Se mide la profundidad de penetración de CO<sub>2</sub> y se calcula el coeficiente de carbonatación con la ecuación (7-5) de difusión de la ley de Fick, para un periodo de tiempo medido en días. Véase (Tabla 63, Tabla 64, Tabla 65, Tabla 66).

$$d = k\sqrt{t} \quad (7-5)$$

Donde

d=Profundidad de carbonatación, mm;

$k$ = Coeficiente de carbonatación,  $\text{mm}/\text{días}^{1/2}$ ;

$t$ =tiempo, días;

**Tabla 63. Profundidad de carbonatación 21 MPa**

**Fotografía 43. Profundidad de carbonatación 21 MPa**

Profundidad de Penetración de CO <sub>2</sub> (mm)				
Mezcla 3000 PSI (21MPa)				
	2428-1		2428-2	
Medición	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
1	23.49	29.52	24.14	23.19
2	20.90	23.70	27.80	23.85
3	26.36	27.03	23.21	21.48
4	27.93	20.44	22.61	17.85
5	27.47	27.69	21.67	22.88
6	30.45	29.00	21.10	23.05
<b>Promedio</b>	<b>26.10</b>	<b>26.23</b>	<b>23.42</b>	<b>22.05</b>
<b>d [mm]</b>	<b>26.23</b>		<b>23.42</b>	
<b>K[mm/días<sup>1/2</sup>]</b>	<b>4.79</b>		<b>4.28</b>	



**Tabla 64. Profundidad de carbonatación 42 MPa**

**Fotografía 44. Profundidad de carbonatación 42 MPa**

Profundidad de Penetración de CO <sub>2</sub> (mm)				
Mezcla 6000 PSI (42MPa)				
	2427-1		2427-2	
Medición	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
1	15.68	16.81	14.07	12.44
2	8.77	8.21	12.37	10.58
3	9.13	11.16	11.63	11.60
4	11.66	9.56	11.62	6.68
5	11.20	16.67	7.40	11.30
6	14.88	7.88	11.94	6.83
<b>Promedio</b>	<b>11.89</b>	<b>11.72</b>	<b>11.51</b>	<b>9.91</b>
<b>d [mm]</b>	<b>11.89</b>		<b>11.51</b>	
<b>K[mm/días<sup>1/2</sup>]</b>	<b>2.17</b>		<b>2.10</b>	



**Tabla 65. Profundidad de carbonatación 49 MPa**

**Fotografía 45. Profundidad de carbonatación 49 MPa**

Profundidad de Penetración de CO <sub>2</sub> (mm)				
Mezcla 7000 PSi (49MPa)				
	2424-1		2424-2	
Medición	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
1	9.79	7.99	6.67	7.23
2	6.25	6.54	8.47	15.61
3	7.65	5.95	4.18	1.68
4	8.11	4.79	15.53	5.00
5	2.84	8.04	8.59	7.47
6	7.10	14.00	9.93	8.65
<b>Promedio</b>	<b>6.96</b>	<b>7.89</b>	<b>8.90</b>	<b>7.61</b>
<b>d [mm]</b>	<b>7.89</b>		<b>8.90</b>	
<b>K[mm/días<sup>1/2</sup>]</b>	<b>1.44</b>		<b>1.62</b>	



**Tabla 66. Profundidad de carbonatación 56 MPa**

**Fotografía 46. Profundidad de carbonatación 56 MPa**

Profundidad de Penetración de CO <sub>2</sub> (mm)				
Mezcla 8000 PSi (56MPa)				
	2423-1		2423-2	
Medición	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
1	3.25	2.45	4.50	5.40
2	4.90	4.53	2.27	2.73
3	4.17	1.98	2.00	5.72
4	5.79	8.60	3.45	5.43
5	3.14	7.02	3.98	4.49
6	4.10	2.66	4.89	4.02
<b>Promedio</b>	<b>4.23</b>	<b>4.54</b>	<b>3.52</b>	<b>4.63</b>
<b>d [mm]</b>	<b>4.54</b>		<b>4.63</b>	
<b>K[mm/días<sup>1/2</sup>]</b>	<b>0.83</b>		<b>0.85</b>	

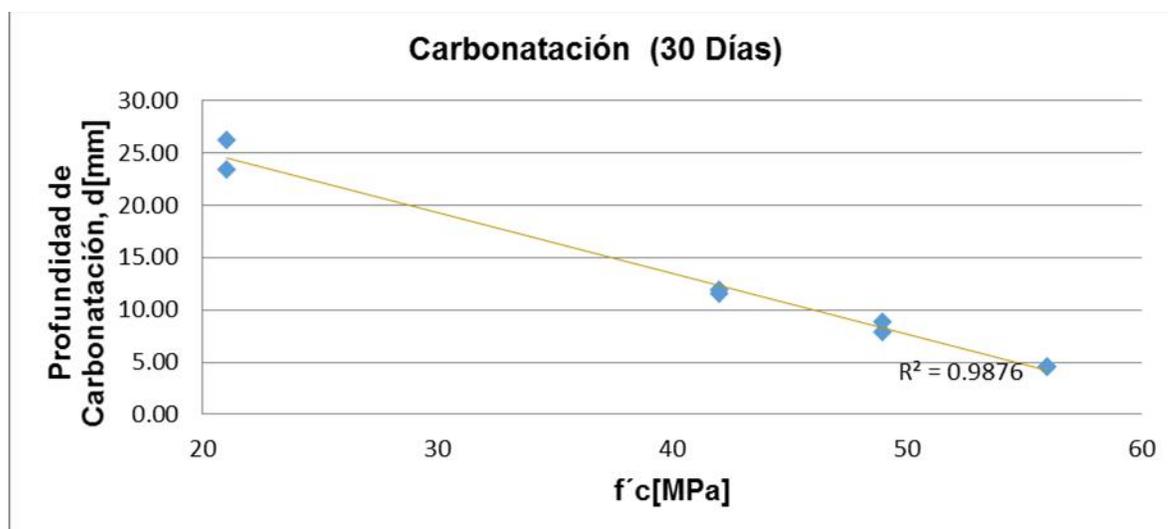
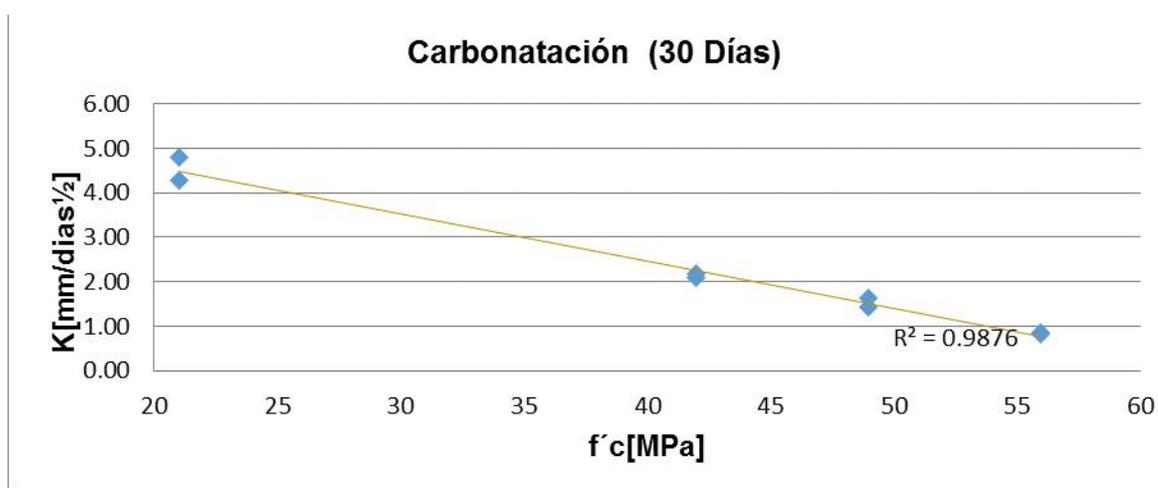


**Tabla 67. Profundidad y coeficiente de carbonatación a 30 días de exposición**

Profundidad y Coeficiente de CO <sub>2</sub>					
Muestra	a/c	MPa	PSI	d [mm]	K[mm/dias <sup>1/2</sup> ]
2428-1	0.67	21	3000	26.23	4.79
2428-2	0.67	21	3000	23.42	4.28
2427-1	0.43	42	6000	11.89	2.17
2427-2	0.43	42	6000	11.51	2.10
2424-1	0.38	49	7000	7.89	1.44
2424-2	0.38	49	7000	8.90	1.62
2423-1	0.33	56	8000	4.54	0.83
2423-2	0.33	56	8000	4.63	0.85

*Análisis de resultados:* Tabla 67

Por medio de la Tabla 67 se resume las profundidades y el coeficiente de carbonatación a una exposición de 30 días. La profundidad y el coeficiente de carbonatación decrecen a medida que se reduce la relación agua material cementante. La profundidad de carbonatación de la mezcla de 21 MPa supera la mitad del espesor de ensayo de 50mm, mientras que la mezcla de 56 MPa no supera la décima parte de su espesor de ensayo (50mm). La velocidad de carbonatación es de 5.64, 2.55, 1.90 veces más rápida, para mezclas de 21, 42 y 49 MPa respectivamente, con referencia a la mezcla de 56 MPa.

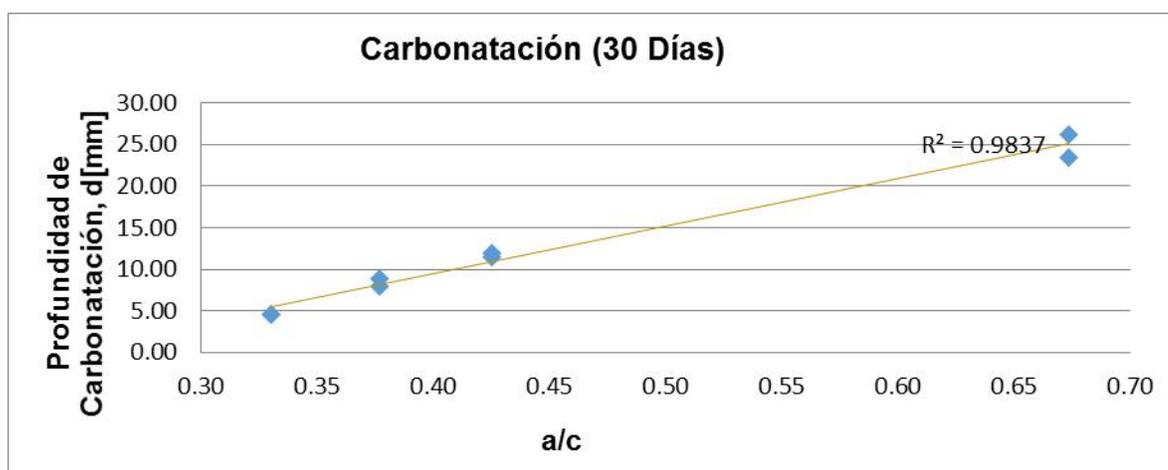
**Figura 32. Profundidad de carbonatación d vs resistencia (MPa)****Figura 33. Coeficiente de carbonatación k vs resistencia (MPa)**

*Análisis de resultados:* Figura 32 y Figura 33

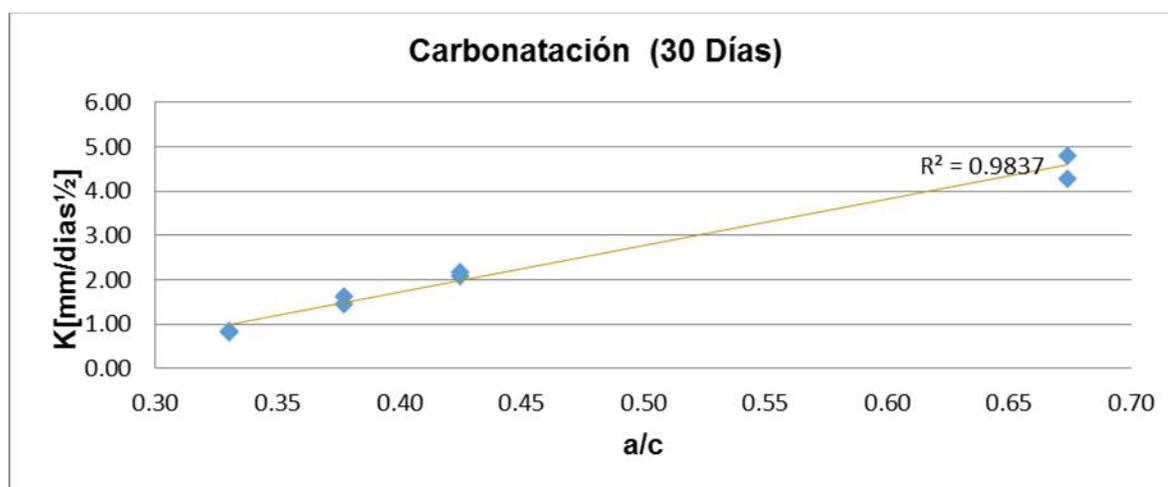
La profundidad y el coeficiente de carbonatación a una exposición a 30 días, están relacionadas a una tendencia lineal con respecto a la resistencia de las mezclas en un grado de confiabilidad del orden del 99%. Las mezclas 21 y 42 MPa son

mezclas más permeables que permiten mayor profundidad de penetración de carbonatación que las mezclas de 49 y 56 MPa en el mismo tiempo de exposición.

**Figura 34. Profundidad de carbonatación d vs relación agua material cementante**



**Figura 35. Coeficiente de carbonatación k vs relación agua material cementante**



*Análisis de resultados:* Figura 34 y Figura 35

La profundidad y el coeficiente de carbonatación a una exposición a 30 días, están relacionadas a una tendencia lineal con respecto a la relación agua material cementante en un grado de confiabilidad del orden del 98%. Las mezclas 49 y 56 MPa por sus bajas relaciones agua material cementante, porosidad y permeabilidad les permite ser unas mezclas más resistentes y durables a la carbonatación. Las mezclas de 21 y 42 MPa permitirán mayor deterioro en sus refuerzos embebidos.

Se realiza el procedimiento de ensayo de carbonatación para un tiempo de exposición de 60 días. Se pretende registrar y comparar la profundidad y el coeficiente de carbonatación de 30 a 60 días. Los datos obtenidos a un tiempo de exposición de 60 días se registran en la Tabla 68.

**Tabla 68. Profundidad y coeficiente de carbonatación a 60 días de exposición**

Muestra	a/c	MPa	PSI	d [mm]	K[mm/días <sup>1/2</sup> ]
2428-1	0.67	21	3000	30.66	3.96
2427-1	0.43	42	6000	17.96	2.32
2424-1	0.38	49	7000	10.01	1.29
2423-1	0.33	56	8000	5.94	0.77

*Análisis de resultados:* Tabla 68

Por medio de la Tabla 68 se resume las profundidades y el coeficiente de carbonatación a una exposición a 60 días. La profundidad de carbonatación incrementó en un 17%, 51%, 13% y 28% para las mezclas de 21, 42, 49 y 56 MPa respectivamente, con referencia a las obtenidas en un tiempo de 30 días. La velocidad de carbonatación para las mezclas de 21 y 42 MPa se reducen al emplear un periodo de exposición más prolongado, las mezclas de 49 y 56 MPa mantienen una menor variación.

Figura 36. Coeficiente de carbonatación  $k$  vs resistencia (MPa) a 60 días de exposición

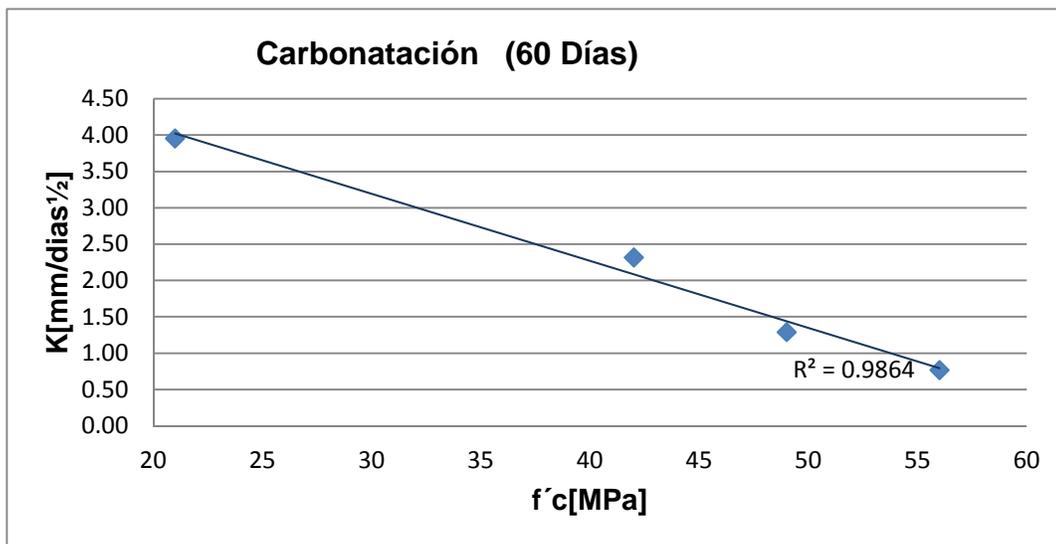
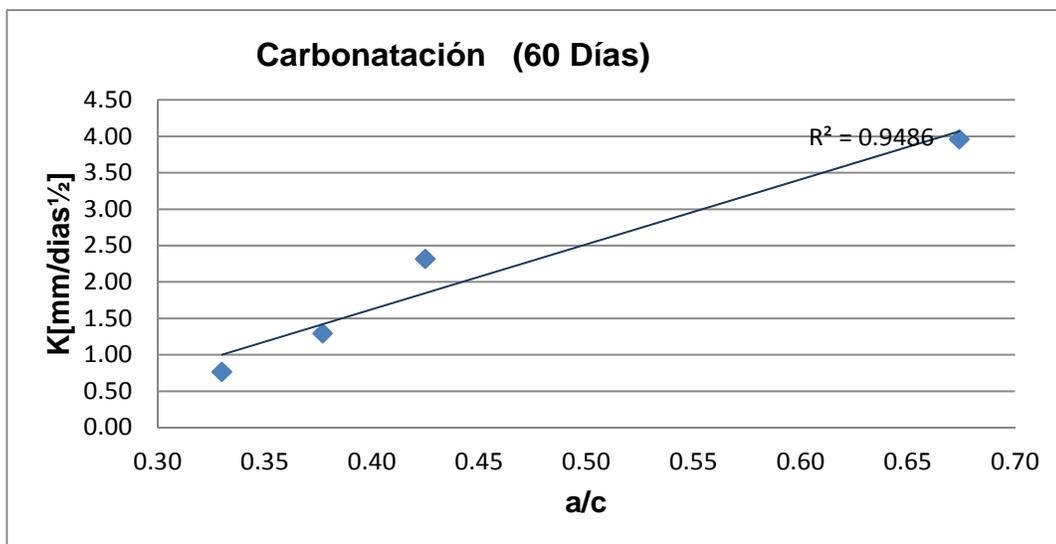


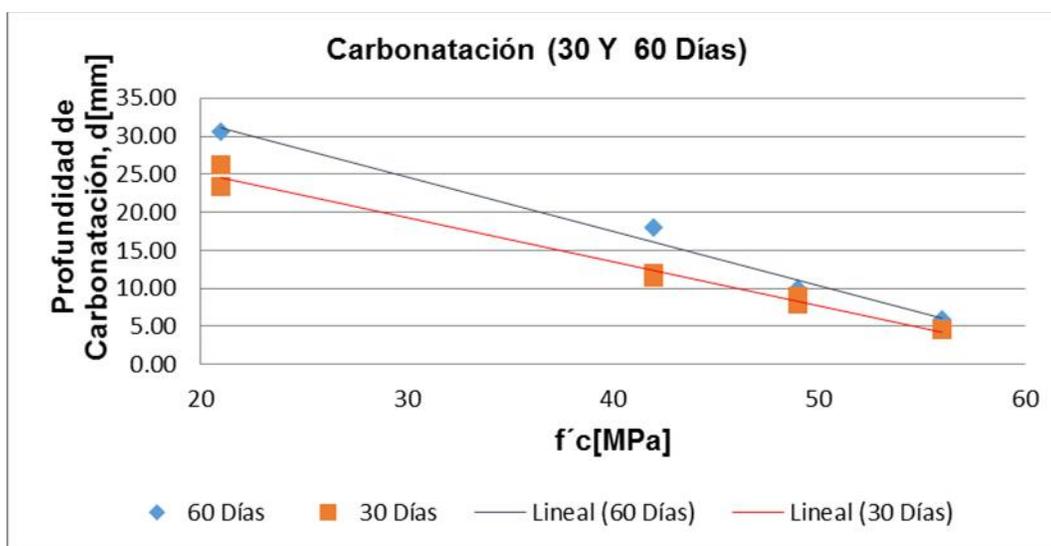
Figura 37. Coeficiente de carbonatación  $k$  vs relación agua material cementante a 60 días de exposición



Análisis de resultados: Figura 36, Figura 37

El coeficiente de carbonatación con una exposición de 60 días con respecto a la resistencia tiene una tendencia lineal inversamente proporcional con un grado de confiabilidad del orden del 99%. La relación de agua material cementante es directamente proporcional al coeficiente de carbonatación con una tendencia lineal del orden del 95%.

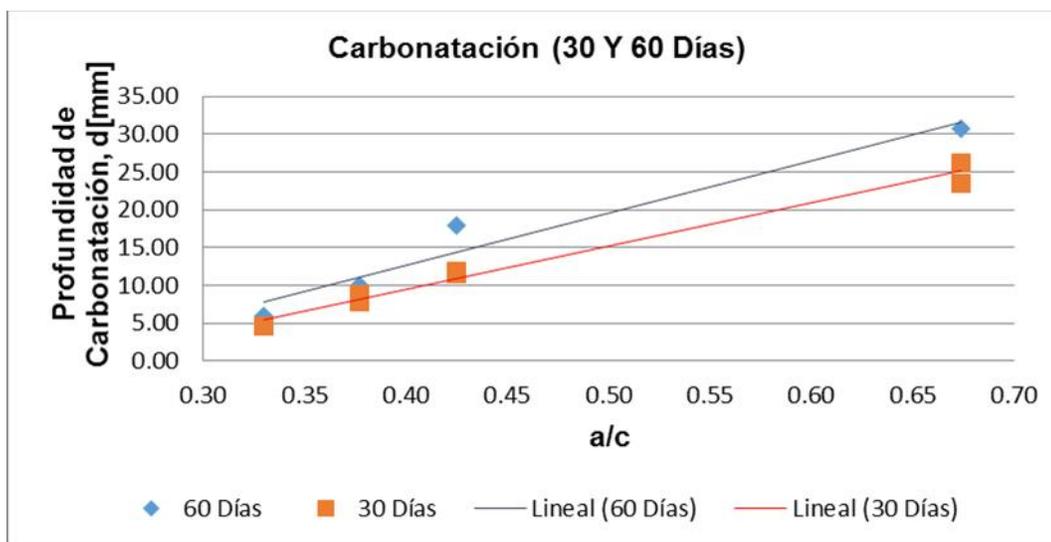
**Figura 38. Profundidad de carbonatación a 30 y 60 días de exposición vs resistencia (MPa)**



*Análisis de resultados:* Figura 38

Por medio de la Figura 38 se puede observar la afectación de la profundidad de carbonatación a dos tiempos de exposición de 30 y 60 días, con respecto a la resistencia de las mezclas. Del análisis de resultados de la Tabla 68 las variaciones porcentuales comentadas no manifiestan un patrón de carbonatación debido a que las mezclas poseen particularidades de dosificación, compactación, permeabilidad, porosidad e interconexión de poros, donde un valor porcentual por sí solo no es concluyente. Las líneas de tendencia, por su parte, sí refleja un patrón de carbonatación, a baja resistencia mayor variación de profundidad de carbonatación, a mayores resistencias la variación de profundidad de carbonatación se reducen considerablemente con tendencia a un punto de profundidad constante de carbonatación.

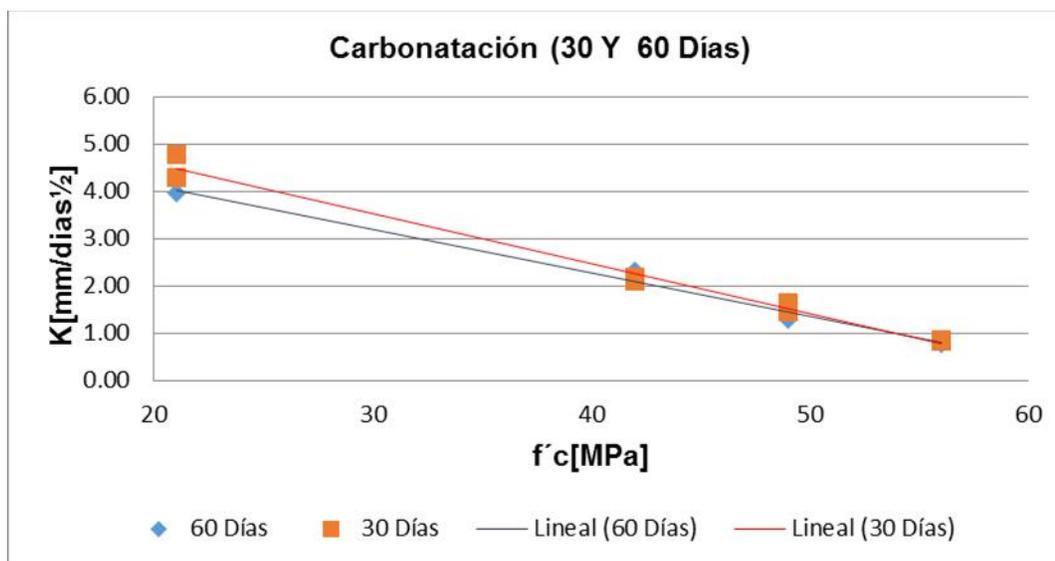
**Figura 39. Profundidad de carbonatación d de 30 y 60 días de exposición vs relación agua material cementante**



*Análisis de resultados:* Figura 39

La profundidad de carbonatación para dos tiempos de exposición 30 y 60 días son directamente proporcionales a la relación de agua material cementante. A medida que la relación agua material cementante se incrementa las tendencias lineales de exposición se abren incrementando la variación de profundidad de carbonatación. En bajas relaciones de agua material cementante la variación de profundidad de carbonatación es menor.

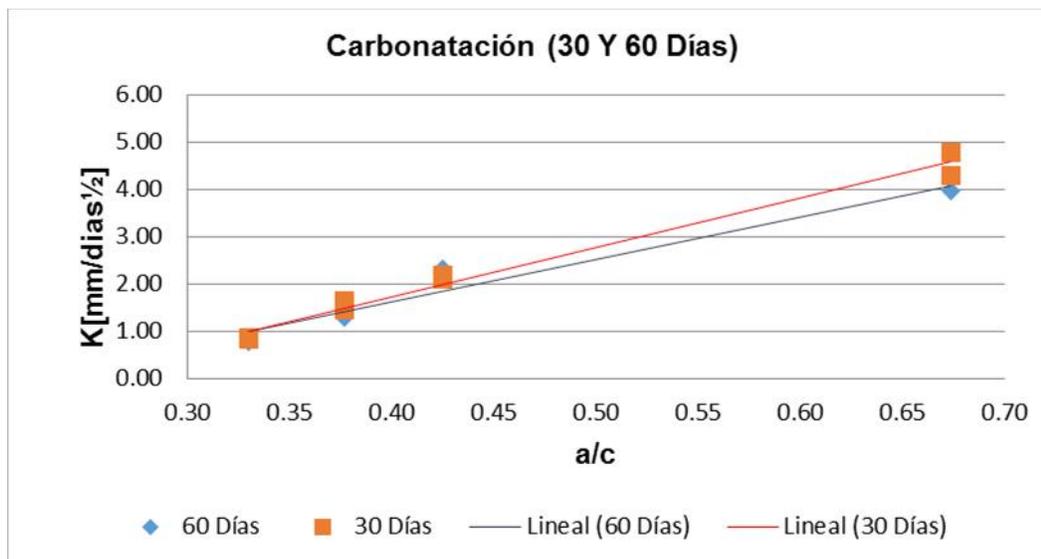
**Figura 40. Coeficiente de carbonatación a 30 y 60 días de exposición vs resistencia (MPa)**



*Análisis de resultados:* Figura 40

La velocidad de carbonatación para dos tipos de exposiciones 30 y 60 días, se observa que es inversamente proporcional al incremento de la resistencia de las mezclas. En bajas resistencias la velocidad de carbonatación a una exposición de 30 días es mayor que la de 60 días, esto se puede interpretar que en un periodo corto la velocidad es mayor por la misma cantidad de poros existentes sin saturar y a medida que se saturan con el tiempo esa misma velocidad disminuirá o se mantendrá constante. Las más altas resistencias tienden a mantener una velocidad constante por la baja penetración a la carbonatación.

**Figura 41. Coeficiente de carbonatación a 30 y 60 días de exposición vs relación agua material cementante**



*Análisis de resultados:* Figura 41

La velocidad de carbonatación de las mezclas con baja relación agua material cementante tienden a ser constantes en el tiempo por su menor variación de profundidad de carbonatación. En mayores relaciones agua material cementante la velocidad se incrementa proporcionalmente y en un incremento de tiempo de exposición, los poros tienden a saturarse y reducirá su velocidad colmatando toda la micro estructura del concreto llegando rápidamente al refuerzo.

### 7.2.6 Resistencia a la Abrasión del Concreto

La resistencia a la abrasión es la capacidad que tiene la superficie del concreto a ser desgastada por rozamiento o fricción. Este desgaste lo generan las condiciones de servicio normal como tránsito peatonal o vehicular en losas, o el efecto de partículas sólidas y flujo continuo de agua en el caso de estructuras hidráulicas.

La resistencia a este proceso depende de tres aspectos básicos: la resistencia intrínseca de los agregados a las acciones abrasivas y su composición granulométrica; la resistencia mecánica del concreto, específicamente a la compresión, y los diferentes aspectos prácticos involucrados en el uso del concreto y la ejecución de la obra.

El tipo de agregado y el acabado o tratamiento superficial tendrá influencia sobre la resistencia a la abrasión. Un agregado duro es más resistente a abrasión que un agregado blando y una superficie más lisa resiste mejor al desgaste que una superficie rugosa.

Un concreto con mayor resistencia a compresión tiene más resistencia a abrasión por lo tanto depende de la relación agua material cementante, de la menor cantidad posible de aire ocluido, de la exudación natural de la mezcla que permite que la capa superficial se vuelve débil al concentrarse el agua exudada.

Según el ACI 3028 para mejorar la resistencia de las estructuras a la abrasión se debe evitar lo siguiente:

- Emplear excesiva agua de mezclado.
- Utilizar la cantidad de cemento adecuada, evitando la insuficiencia.
- Revenimiento alto que provoque el movimiento de las partículas ligeras hacia la superficie y el sangrado.
- Manipulación excesiva del concreto.
- Contenido de aire que no considere las condiciones de exposición.
- Prácticas inadecuadas de acabado que favorecen el proceso de sangrado.
- Realización del acabado superficial con adición de agua.
- Formas y prácticas de curado no adecuadas.
- Carbonatación.

- Disminución de la resistencia potencial del concreto.

Se procede a realizar el ensayo de abrasión a las mezclas de 21, 42,49 y 56 MPa. Véase (Fotografía 47).

#### Fotografía 47. Montaje para la obtención del ensayo de Abrasión



Para el cálculo de la resistencia a la abrasión se emplea la ecuación (7-6) de la norma NTC 5147 y ASTM 418. Los cálculos se registran en la Tabla 69, Tabla 70, Tabla 71 y Tabla 72, para mezclas de 21, 42, 49 y 56 MPa respectivamente.

$$l_h = AB + (20 - FC) \quad (7-6)$$

$l_h$  = Longitud de la huella resultante, mm;

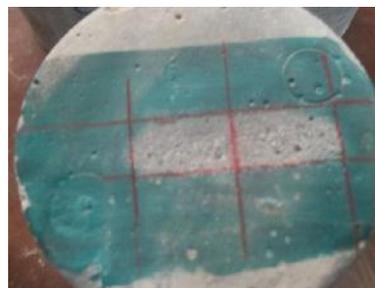
$F_c$  = Factor de calibración, mm;

$AB$  = Longitud de la huella medida, mm;

**Tabla 69. Resistencia a la abrasión, longitud de huella lh ( 21MPa)**

**Fotografía 48. Resistencia a la abrasión, longitud de huella lh (21 MPa)**

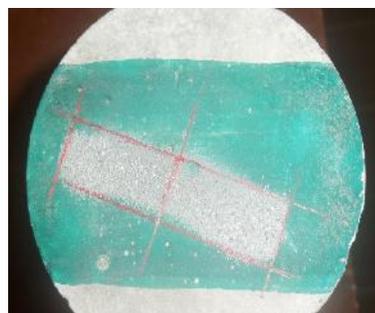
<b>Resistencia a la Abrasión 3000 PSi/21 MPa</b>			
<b>Muestra</b>	<b>AB [mm]</b>	<b>Fc</b>	<b>lh [mm]</b>
2428-1	20.60	19.80	20.80
2428-2	19.30	19.80	19.50
2428-3	19.80	19.80	20.00



**Tabla 70. Resistencia a la abrasión, longitud de huella lh ( 42MPa)**

**Fotografía 49. Resistencia a la abrasión, longitud de huella lh ( 42MPa)**

<b>Resistencia a la Abrasión 6000 PSi/42 MPa</b>			
<b>Muestra</b>	<b>AB [mm]</b>	<b>Fc</b>	<b>lh [mm]</b>
2427-1	17.00	19.80	17.20
2427-2	18.90	19.80	19.10
2427-3	18.80	19.80	19.00



**Tabla 71. Resistencia a la abrasión, longitud de huella lh ( 49MPa)**

**Fotografía 50. Resistencia a la abrasión, longitud de huella lh ( 49MPa)**

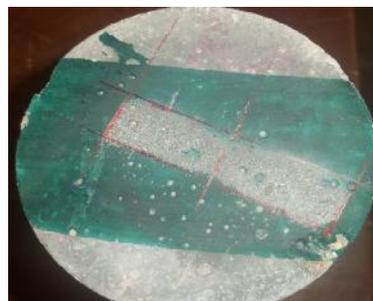
<b>Resistencia a la Abrasión 7000 PSi/49 MPa</b>			
<b>Muestra</b>	<b>AB [mm]</b>	<b>Fc</b>	<b>lh [mm]</b>
2424-1	16.60	19.80	16.80
2424-2	16.80	19.80	17.00
2424-3	16.40	19.80	16.60



**Tabla 72. Resistencia a la abrasión, longitud de huella lh ( 56MPa)**

**Fotografía 51. Resistencia a la abrasión, longitud de huella lh ( 56MPa)**

<b>Resistencia a la Abrasión 8000 PSI/56 MPa</b>			
<b>Muestra</b>	<b>AB [mm]</b>	<b>Fc</b>	<b>lh [mm]</b>
2423-1	15.60	19.80	15.80
2423-2	13.60	19.80	13.80
2423-3	14.50	19.80	14.70



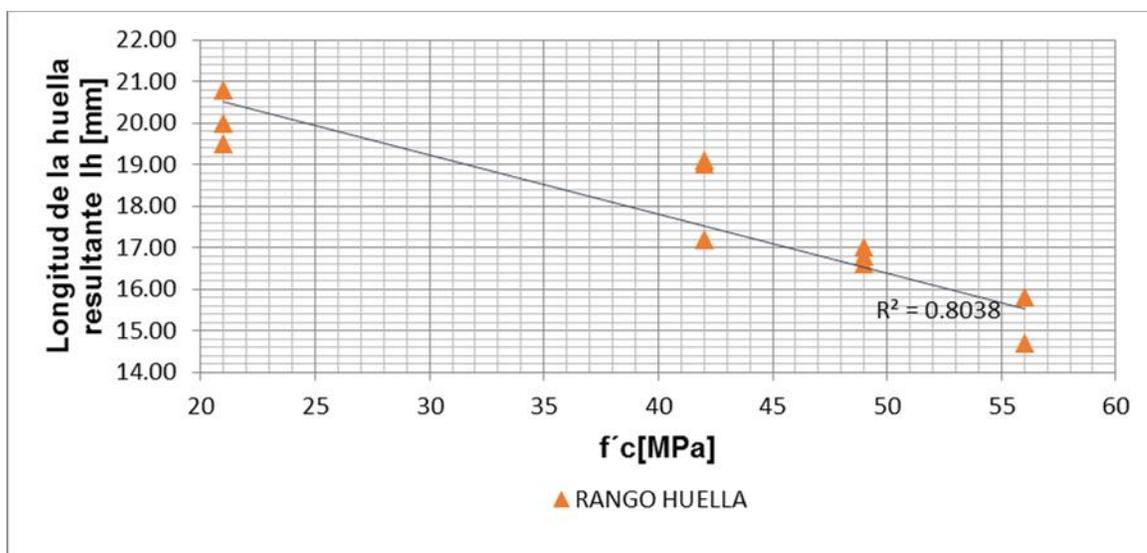
La Tabla 73. presenta el resumen de la resistencia promedio de abrasión.

**Tabla 73. Resumen promedio resistencia a la abrasión, longitud de huella lh**

<b>Resistencia Abrasión</b>				
<b>Muestra</b>	<b>a/c</b>	<b>MPa</b>	<b>Psi</b>	<b>lh [mm]</b>
2428	0.67	21	3000	20.10
2427	0.43	42	6000	18.43
2424	0.38	49	7000	16.80
2423	0.33	56	8000	14.77

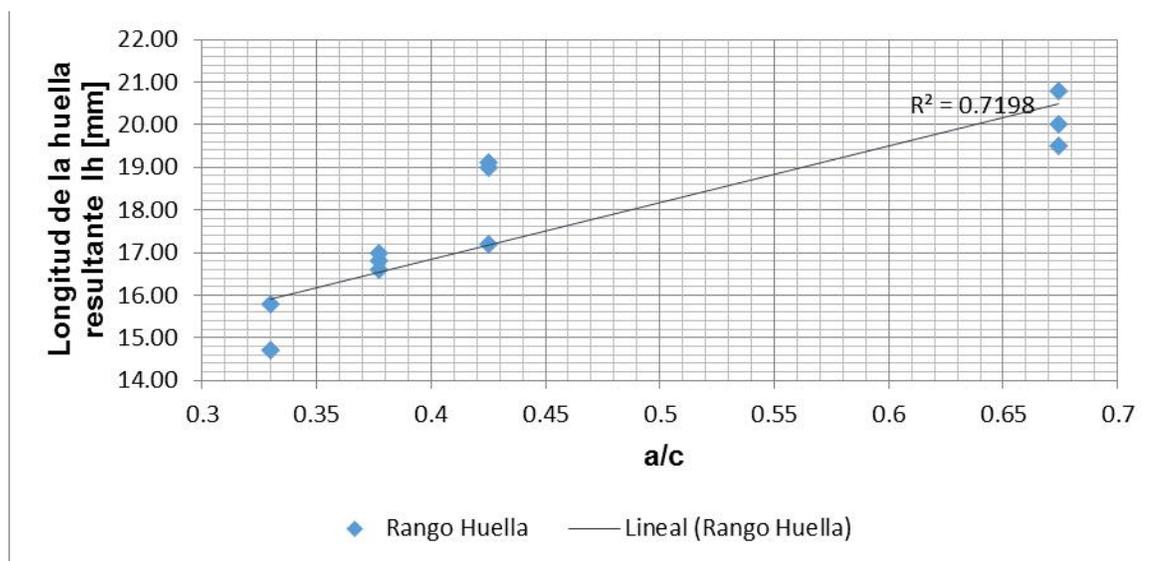
*Análisis de resultados:* Tabla 73

Por medio de la longitud de huella se pudo determinar la resistencia a la abrasión. La huella se incrementa a la vez que el contenido de agua material cementante aumenta. A mayor resistencia a la abrasión menor longitud de huella. Las mezclas de 42, 49 Y 56 MPa poseen mayor resistencia a la abrasión del orden de 8.3 %, 16% y 27% respectivamente, con referencia a la resistencia de abrasión de la mezcla de 21 MPa. Véase (Fotografía 52).

**Fotografía 52. Resistencia a la abrasión para 21,42,49 y 56 MPa****Figura 42. Longitud de huella  $l_h$  vs resistencia (MPa)**

*Análisis de resultados:* Figura 42

A mayor resistencia compresión mayor resistencia a la abrasión y por consecuencia la longitud de huella es menor. Pero se debe recordar que aparte de la resistencia a compresión esta intrínseca la resistencia de los agregados a las acciones abrasivas y su composición granulométrica.

**Figura 43. Longitud de huella lh vs relación agua material cementante**

*Análisis de resultados:* Figura 43

Bajos contenidos de agua/material cementante favorecen la alta resistencia, obteniendo bajos valores de huella a la abrasión. Se requiere que este tipo de concretos estén acompañados de un curado idóneo y evitar carbonatación en su estructura.

## 8 CONCLUSIONES

En las conclusiones que se presentan a continuación se resaltan los objetivos planteados inicialmente en este documento. Las tablas y figuras descritas en cada una de las conclusiones poseen su respectivo análisis de resultados que respaldan, complementan y enlazan el documento.

### **Estudiar y caracterizar concretos de alto desempeño con un enfoque práctico a la durabilidad, sostenibilidad y controles de calidad:**

La implementación de concretos de alto desempeño en Colombia es la respuesta a las problemáticas que las obras en la actualidad exigen. Es una mezcla eficiente que permitirá la fácil colocación, compactación, sin segregación y manejabilidad en obra. Acompañada de propiedades en el material más allá de su resistencia, con características a largo plazo, ductilidad, estabilidad y larga vida de servicio en condiciones ambientales severas. Véase (Capítulo 3 numeral 3.1 “Definición” pág. 18).

Si bien los requisitos de resistencia son importantes a la hora de diseñar una estructura, se debe tener en cuenta los requisitos de durabilidad, y el tipo de ambiente al que estará sometido, ya que sería anti-económico realizar las reparaciones en las estructuras antes de que cumpla su ciclo de vida útil. Los concretos de alto desempeño y durabilidad están referidos a su baja porosidad y a la mejora de las características de la microestructura del concreto. Véase (Capítulo 3 numeral 3.2 “Diferencia entre concreto de alto desempeño vs concreto de alta resistencia.” pág.19).

La dosificación de un concreto de alto desempeño requiere de la evaluación previa del comportamiento esperado del material, de la vida útil de servicio, de prever la facilidad de colocación y compactación en obra. Se necesita de una cantidad de ensayos de proporciones que le permitan garantizar características mecánicas y de durabilidad. El desarrollo de esta clase de ensayos facilita su fabricación y permiten obtener rápidamente el diseño. Estas proporciones depende de un juicioso balance entre el tamaño máximo del agregado, adiciones minerales (humo de sílice, ceniza volante, escoria) y aditivos químicos que permitan manejabilidad, reducir permeabilidades de sangrado, adherencia, reducir porosidad, mantener bajas relación agua material cementante, baja variación de la dosificación básica y control de temperatura. Todo esto acompañado del curado, transporte y logística de colocación en obra. Véase (Capítulo 3 numeral 3.4 “Proporciones en la Mezcla de Alto Desempeño.” pág. 22), (Tabla 2 a la Tabla 7).

Curar el concreto es mantener las condiciones de humedad y temperatura. El concreto por sí solo no tiene suficiente agua para desarrollar sus propiedades. El curado evita que su microestructura sea afectada por la evaporación de agua generando poros y a su interconexión que facilitan la permeabilidad y vulnerabilidad al deterioro. En los ensayos de resistencia a compresión de las probetas a edades tempranas entre 3 y 8 días, después de retiradas del curado, a aquellos especímenes que se encontraban más tiempo expuestos al ambiente, en cuestión de minutos, las resistencias obtenidas eran inferiores a las iniciales. Véase (Capítulo 3 numeral 3.8 “Contracción y Curado.” pág.31).

La utilización de concretos de alto desempeño requieren consideraciones desde su llegada, transporte, manejo, tiempos de manipulación los cuales son menores que la de un concreto convencional, su alta fluidez por la incorporación de aditivos, altos contenidos de cemento y baja segregación. A esto sumado que se debe realizar un control apropiado de imprevistos con la ayuda de equipos eficientes que permitan mantener la homogeneidad y velocidad de colocación y compactación de la mezcla. Véase (Capítulo 3 numeral 3.9 “Utilización” pág. 32).

La durabilidad del concreto dependerá de una acertada estimación del tipo de amenaza (física o química, en estado gaseoso o líquido) y transporte (absorción, permeabilidad, difusión, carbonatación, abrasión, entre otras) que permitan obtener herramientas de evaluación del tipo de deterioro y tiempo de servicio que asume el diseñador al elegir una determinada dosificación de control. Véase (Capítulo 3 numeral 3.10 “Durabilidad” pág. 33).

La sostenibilidad de los concretos de alto desempeño dependerá como se incorpore en la fabricación actividades de reciclaje, reutilización, recuperación de materiales, uso de materias primas alternas y el uso eficiente del agua. Las nuevas exigencias de sostenibilidad orientaran esfuerzos a satisfacer necesidades de producir concretos auto-compactables, flexibles, auto-limpiables, resistentes y translucidos. Véase (Capítulo 4 numerales 4.2 al 4.6 “Sostenibilidad, Durabilidad y Reusó” pág. 35).

Los controles de calidad en los concretos de alto desempeño, son la base para ajustar las etapa de industrialización, desde la obtención de los insumos idóneos, con conocimiento previo de su procedencia, con exigencia de certificados de productos como el material cementante y aditivos hasta el mismo proceso de fabricación con la dosificación teórica establecida, que permitirá realizar con mayor experiencia menores correlaciones de ajuste a las mezclas. La calidad aportara a sensibilizar el tratamiento de los concretos desde el amasado, transporte, instalación, desencofrar, descimbrar, hasta el mismo curado, para el desarrollo pleno de un material con cualidades respaldadas por cada una de sus etapas de

fabricación y puesta en sitio. Véase (Capítulo 5 numeral 5.1 “Tipos de Control” pág. 42).

**Definir los campos de aplicación:**

Los concretos de alto desempeño han demostrado una infinidad de aplicaciones en todas las ramas de la ingeniería civil (estructuras, vías, hidráulica, geotecnia), que requieren su implementación inmediata en la sociedad colombiana. Se observa que muchos elementos estructurales carecen de garantía a la sociedad y tales exigencias como mínimo deben respetar su durabilidad en el tiempo y cumplir en el mismo las funciones para las cuales fue concebido. Continuar con una mentalidad tradicionalista en el uso de concretos convencionales únicamente generará mantenimiento y rehabilitaciones con altos costos, que entorpecen el desarrollo de nueva infraestructura de exigencia actual. Véase (Capítulo 6 numerales 6.1 a 6.4 “Aplicaciones en la ingeniería” pág. 45).

**Elaborar y ensayar proporciones para obtener mezclas con cualidades de alto desempeño. Comparar cualidades que permitan determinar ventajas particulares:**

Al obtener la resistencia mecánica, tomando el límite inferior de resistencia para todas las mezclas, a una edad de 3 días se alcanzó el orden del 72%, a los 7 días el 97%, a los 28 días el 131% y a los 56 días el 136% de la resistencia esperada. Las muestras a edades tempranas con la dosificación descrita en este documento, se aproximan rápidamente a la resistencia nominal. Las mezclas con menores relaciones agua/material cementante, después de la edad de 28 días, obtienen un mayor rango de resistencia, tomando como referencia la resistencia esperada de la mezcla. Véase (Capítulo 7 numeral 7.1.1 “Resistencia a Compresión” pág. 64), (Tabla 12 a la Tabla 15), (Figura 8 a la Figura 11).

Los módulos de elasticidad se incrementan en mayor orden a razón de la disminución de la relación agua/material cementante, por lo que incentiva la reducción de cantidad de agua a favor de obtener mayores ventajas de cualidades mecánicas y de durabilidad. En mezclas de 42, 49 y 56 MPa, se registró un incremento de magnitud de módulo de elasticidad del orden del 17%, 21%, 40% respectivamente, en comparación a la mezcla de uso convencional de 21 MPa. Véase (Capítulo 7 numeral 7.1.2 “Módulo de Elasticidad” pág. 71), (Tabla 33 y Figura 20).

En las diferentes mezclas de concreto, la velocidad y capacidad de succión capilar se incrementan con el aumento de la relación agua/material cementante. Las velocidades máximas de absorción registradas en los ensayos fueron de 5.7, 4.69, 3.31, 2.13 mm/s para mezclas de 21, 42, 49 y 56 MPa respectivamente. Véase (Capítulo 7 numeral 7.2.1 “Sortividad” pág. 95), (Tabla 42 y Figura 21).

Los concretos con igual relación agua material cementante al aumentar el tamaño máximo del agregado grueso ocasiona un incremento en la porosidad y por lo tanto en la absorción de agua. Facilitando el ingreso de agentes externos. La presencia de poros porcentual máxima registradas en los ensayos es de 10.15, 13.29, 7.81, 6.79 % para mezclas de 21, 42, 49 y 56 MPa respectivamente. Véase (Capítulo 7 numeral 7.2.1 “Sortividad” pág. 95), (Tabla 35 a la Tabla 39).

La permeabilidad es un mecanismo por el cual se produce el movimiento de fluidos a través de los poros interconectados del concreto, en consecuencia de una presión exterior. Para que un concreto sea impermeable se busca que la red capilar sea más fina, pero implica el incremento de la absorción del concreto. Por lo tanto se requiere del balance de un concreto impermeable con baja absorción. Véase (Capítulo 7 numeral 7.2.2 “Permeabilidad” pág. 104).

Los ensayos de permeabilidad (profundidad de penetración y coeficiente de permeabilidad) con base a la norma NTC-4483, permite clasificar a las mezclas de 21 y 42 MPa en rango de permeabilidad media; las mezclas de 49 y 56 MPa, en un rango de permeabilidad bajo. Las bajas relaciones de agua material cementante obtienen permeabilidades bajas del concreto. Véase (Tabla 47, Tabla 48, Tabla 53, Figura 23, Figura 24 y Figura 25).

Las mezclas con mayor relación agua material cementante fueron más permeables al ion cloruro. Por medio de la norma ASTM-C1202-10 se caracterizaron las mezclas de 21 y 42 MPa con moderada y las mezclas de 49 y 56 MPa con baja permeabilidad al ion cloruro. Esta permeabilidad está relacionada a la micro estructura capilar del concreto y a la interconexión de los mismos, el control de la porosidad en las mezclas permite garantizar el desempeño a la permeabilidad de ion cloruros. Véase (Capítulo 7 numeral 7.2.3 “Penetración Ion Cloruro” pág. 115), (Tabla 54, Tabla 55 y Figura 27).

El coeficiente de difusión de los cloruros depende de la microestructura de poros, de su continuidad dentro del concreto, del curado, de la compactación de la mezcla, de la relación agua material cementante, del tipo de adiciones minerales o químicas, de la calidad del cemento, de su colocación y manejo en obra. Véase (Capítulo 7 numeral 7.2.4 “Coeficiente de Difusión” pág. 119).

Las mezclas de 21 y 42 MPa presentaron una profundidad y coeficiente de difusión al ion cloruro moderadamente alto en comparación a las mezclas de 49 y 56 MPa. Las baja relación agua material cementante reducen en mayor orden la susceptibilidad a la difusión de cloruros evitando su deterioro. Véase (Tabla 60, Tabla 61, Figura 29 y Figura 31).

El aumento de carbonatación depende, en gran medida, del contenido de humedad, concentración de  $\text{CO}_2$  y de la permeabilidad del concreto. Para que haya carbonatación, debe haber humedad y esta avanza más rápidamente cuando

---

la humedad relativa en el concreto se encuentra entre el 50 y el 60 por ciento. Para producir concretos de baja permeabilidad se requiere de bajas relaciones agua material cementante, idónea compactación, uso de puzolanas como cenizas volantes o humo de sílice, que disminuyan el contenido de poros y su interconexión dentro del concreto. Véase (Capítulo 7 numeral 7.2.5 “Resistencia a la Carbonatación del Concreto” pág. 127).

La carbonatación puede causar problemas de corrosión incluso en un concreto de alta calidad, por bajo recubrimiento del concreto, superficies con grietas y alto contenido de poros que proporcionan una ruta directa al acero de refuerzo. Si un concreto estará más expuesto a la carbonatación por circunstancias naturales, se debe tener en cuenta el uso de bajas relaciones de agua material cementante que permitirá controlar considerablemente la profundidad y velocidad de carbonatación. Véase (Tabla 67, Tabla 68, Figura 39 y Figura 41).

La resistencia a la abrasión depende de la resistencia intrínseca de los agregados, de la resistencia mecánica del concreto y de aspectos de usos y ejecución en obra. Las mezclas de 42, 49 Y 56 MPa poseen mayor resistencia a la abrasión del orden de 8.3 %, 16% y 27% respectivamente, con referencia a la resistencia de abrasión de la mezcla de 21 MPa. La resistencia a la abrasión es directamente proporcional a la resistencia a compresión del concreto. Véase (Capítulo 7 numeral 7.2.6 “Resistencia a la Abrasión del Concreto” pág. 140), (Tabla 73 y Figura 43).

## 9 Bibliografía

- ACI-318S-11. (2011). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. American Concrete Institute.
- Arquitectura, R. D. (28 de agosto de 2014). *Genera Ingeniería y Arquitectura*. Obtenido de Genera Ingeniería y Arquitectura : <http://generaiaes/experiencia-profesional/proyectos-de-estructuras-de-obra-nueva-y-rehabilitacion/teatro-torre vieja>
- Asocreto. (2010). La sostenibilidad conduce a la durabilidad de puentes en concreto. *Noticreto* 99, 4.
- Asocreto. (2013). Infraestructura de Transporte. *Noticreto*, 117.
- Asocreto. (2013). Patología Del Concreto. *Noticreto*.
- ASTM C1202-10, A. S. (Febrero de 2010). Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Copyright.
- ASTM-C1585. (2007). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes. *American Society for Testing and Materials*, 6.
- ASTM-C418-12. (2012). Metodo de prueba estandar para resistencia a la abrasión del Hormigon por chorro de arena. *American Society for Testing and Materials*, 6.
- Baker, W. K. (2008). *Specifying High Performance Concrete for the Trump Tower: Chicago*. Obtenido de Specifying High Performance Concrete for the Trump Tower: Chicago.
- Gomezjurado S., J. (2007). CAD concreto de alto desempeño. *Noticreto* 33, 1.
- Guzmán, J. (27 de septiembre de 2010). *Los 10 edificios más altos del mundo en construcción*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2013, de <http://pasalavida.org/2010/09/27/los-10-edificios-mas-altos-del-mundo-en-construccion/>
- Guzmán, J. (27 de Septiembre de 2010). *Los 10 edificios más altos del mundo en construcción*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2013, de <http://pasalavida.org/2010/09/27/los-10-edificios-mas-altos-del-mundo-en-construccion/>

- 
- IMCYC, I. M. (2011). Concreto de alto desempeño Vs Concreto de alta resistencia. 1 era parte. *Construcción y Tecnología en concreto*, 1.
- IMCYC, I. M. (2011). Concreto de Alto desempeño Vs de alta resistencia. 2da parte. *Construcción y Tecnología en concreto*, 1.
- Infrared Camera*. (27 de Mayo de 2014). Obtenido de <http://www.youbioit.com/>
- Jenkins, D. (2007). Concreto de alto desempeño, HPC: mas alla de la resistencia. *Noticreto 85*, 4.
- M. Mancio, J. M. (2010). Instantaneous In-Situ Determination of water-cement Ratio of Fresh Concrete. *ACI Materials Journal*.
- Mega construcciones*. (14 de Agosto de 2013). Obtenido de <http://megaconstrucciones.net>
- Metodo de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua. (1998). En I. C. Arquitectura, *Norma Técnica Colombiana* (pág. 6). Santafé de Bogota D.C: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- mural.uv.es. (2013). *Playas e Islas*. Recuperado el 5 de diciembre de 2013, de [http://mural.uv.es/mabelo/fotos\\_playa.html](http://mural.uv.es/mabelo/fotos_playa.html)
- NSR10. (2010). *Reglamento Colombiano de Construccion Sismo Resistente*. Bogota D.C: Asociacion Colombiana de Ingenieria Sismica.
- NTC-4483. (23 de Septiembre de 1998). Metodo de Ensayo para Determinar la Permeabilidad del Concreto al Agua. Bogota D.C, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Tecnicas (INCONTEC).
- P.R, R. (2010). A case study on high performance concrete pavement containing slag cement. *ACI 000548- 0004*, 43.
- Panchalan, R., & Ramakrishnan, V. (2008). A new accelerated rapid chloride permeability test for measuring permeability of HPC for highway and bridge applications. *ACI 000488- 0010*, 133.
- Prabyc. (03 de 12 de 2012). Recuperado el 15 de 03 de 2014, de Los edificios más altos de Colombia: <http://prabyc.com.co/Noticias/59/Los-edificios-mas-altos-de-Colombia->
- Ren, X., & Yang, W. (2009). Behavior of high-performance concrete under uniaxial and biaxial loading. *ACI Materials Journal Vol.105 No.6*, 10.

- 
- Rodriguez Valenzuela, S. (2014). Concreto mas sostenible: Concreto por desempeño. *Noticreto* 122, 3.
- Sandino Pardo, A. (2008). Necesidad y posibilidades del concreto de alta resistencia. *Tecnología del hormigón.*, 13.
- Sarkisian, M. M. (2008). *Sculpted High-Rise: The Al Hamra Tower*. Obtenido de *Sculpted High-Rise: The Al Hamra Tower*.
- Segura Franco, J., & Velez, J. E. (2012). Concreto de alto desempeño en edificios. *Noticreto* 114, 4.
- Sengul, O., & Gjorv, O. E. (2009). Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. *ACI Materials Journal Vol.105 No.6*, 6.
- Taringa puentes mas famosos*. (17 de Enero de 2012). Obtenido de <http://www.taringa.net/posts/imagenes/Los-20-Puentes-mas-Famosos-del-Mundo>.
- the Skyscraper Center*. (2014). Obtenido de <http://www.ctbuh.org/>
- Titan Edificaciones*. (2014). Obtenido de <http://www.titancemento.com/>
- Vidaud, I. y. (2011). Prefabricados de concreto: Prominencia y competitividad. *Construcción y Tecnología En Concreto*, 3.